# علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

ISSN 2588-5952

بهار ۱۴۰۴ — جلد چهل و هشتم شماره ۱

انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

انجمن هیدرولیک ایران
Iranian Hydraulic Association



| عنوان | نویسندگان | صفحه |
|---|---|---|
| ارزیابی روش‌های ترکیب داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی و ماهواره‌ای در تصحیح و بهبود عملکرد داده‌های بارش در سطح حوضه (مطالعه موردی: حوضه آبریز مند) | علی اسکندری، حیدر زارعی، عبدالرحیم هوشمند و علی محمد آخوندعلی | ۱ |
| بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع یخبندان‌ها در استان اصفهان با استفاده از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم | الهام مظاهری، جهانگیر عابدی کوپایی، منوچهر حیدرپور، محمد جواد زارعیان و سید علیرضا گوهری | ۲۱ |
| بررسی بازده اقتصادی توزیع آب بر مبنای قیمت تمام شده آب در بخش کشاورزی با استفاده از اصلاح الگوی کشت (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین) | حامد مازندرانی زاده و سیده مرضیه حسینی | ۳۹ |
| تعیین ضرایب گیاهی یگانه، دوگانه و تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز با استفاده از لایسیمتر بیلان آبی | فاطمه رزاقی، محمد اسماعیلی و علیرضا سپاسخواه | ۵۹ |
| مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی تبخیر-تعرق مرجع روزانه وتوزیع مکانی آن(مطالعه موردی: استان زنجان) | سیمین گنجه‌ای و امیر حسین ناظمی | ۷۷ |
| آشکارسازی تغییرات اقلیمی در تبخیر تعرق مرجع در استان کرمانشاه با استفاده از سامانه نیاز آب | مهدی جوزی، نیاز علی ابراهیمی پاک و سید نرگس حسینی | ۹۳ |
| ارزیابی کیفیت آب رودخانه گاماسیاب با استفاده از شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در دو فصل بهار و تابستان | مریم ابراهیمیان نجف آبادی، علیرضا ایلدرمی، ثمر مرتضوی و ابراهیم محمدی‌منش | ۱۱۳ |
| بررسی تأثیر سرعتِ کرنش و رطوبت بر مقاومت کششی مستقیم خاک‌های رسی تثبیت شده با بنتونیت، آهک و سیمان | مسعود اولی پور، مجید قرینه و سید عبدالله حسینی دهدشتی | ۱۲۷ |

**علوم و مهندسی آبیاری**

**(علمی)**

**جلد چهل و هشتم شماره ۱** **بهار ۱٤۰٤**

**مدیر مسؤول: سعید برومندنسب**

**سردبیر: سیدمحمود کاشفی‌پور**

**مدیر داخلی: مهدی دریایی**

**تایپ و صفحه آرایی: ندا یزدانی**

**ویراستار: ندا یزدانی**

## هیأت تحریریه:

| | | |
|---|---|---|
| آخوندعلی، علی‌محمد | استاد | هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز |
| حیدرپور، منوچهر | استاد | آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان |
| زندپارسا، شاهرخ | استاد | آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز |
| قمشی، مهدی | استاد | سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز |
| کاشفی‌پور، سیدمحمود | استاد | سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز |
| لیاقت، عبدالمجید | استاد | آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران |
| حسین زاده دلیر، علی | استاد | گروه مهندسی آب- دانشکده کشاورزی- دانشگاه تبریز. |
| ناصری، عبد علی | استاد | آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز |
| استفانو پالیارا | استاد | گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیزا،ایتالیا |
| لای سای هین | دانشیار | گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مالایا،مالزی. |
| رضا احمدیان | استاد | گروه مهندسی عمران،دانشکده مهندسی، دانشگاه کاردیف، انگلستان |
| هِنک ریتزما | دانشیار | گروه مدیریت منابع آب، گروه علوم محیط زیست،دانشگاه واگنینگن و پژوهش، هلند |

صاحب امتیاز: دانشگاه شهید چمران اهواز ـ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

کلیه مکاتبات از طریق سردبیر مجله به نشانی اهواز ـ دانشگاه شهید چمران اهواز ـ دانشکده مهندسی آب و محیط زیست ـ دفتر مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری تلفن ۰۹۰۴۶۳۰۵۶۴۸ و دورنگار ۳۳۶۵۶۷۰۳ (۰۶۱) صورت گیرد.

این مجله در سایت **http://jise.scu.ac.ir** نمایه می شود.

نشانی پست الکترونیکی: **JISE.Water@scu.ac.ir** و **JISE.Water@yahoo.com**

مجوز انتشار از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی ۱۲۴/۱۰۳۶۲ به تاریخ ۷۷/۱۰/۸ و مجوز دفتر بررسی نشریات وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ۳/۱۱/۱۲۶۴ به تاریخ ۲۹ /۸۸/۷ برای مجله علوم و مهندسی آبیاری

# بسم الله الرحمن الرحيم

# اسامی بررسی کنندگان مقالات این شماره

| | |
|---|---|
| احدیان | جواد |
| احمدآلی | خالد |
| احمدی | فرشاد |
| اسلامیان | سعید |
| بهمنی | امید |
| بیژنوند | سجاد |
| جوزی | مهدی |
| دحیماوی | عادل |
| رسول زاده | علی |
| ساسانی | حسین |
| سبز قبائی | غلامرضا |
| سعیدی نیا | مهری |
| سید کابلی | سید حسام |
| شاهنظری | علی |
| شریفی | محمدرضا |
| شیروانیان | عبدالرسول |
| صمدیان فرد | علی |
| مداح | محمدامین |

# پیشگفتار

سپاس و ستایش پروردگار متعال که بر ما منت گذاشت تا با همت و پشتکار اعضاء هیأت تحریریه، کارکنان مجله، همکاری داوران و ویراستاران، جلد ۴۸، شماره ۱ مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری با خرسندی فراوان به علاقه‌مندان علوم مهندسی آب تقدیم گردد.

مجله علوم و مهندسی آبیاری یک سابقه حدود ۴۳ ساله دارد و وزارت علوم و تحقیقات و فناوری مجوز این مجله علمی- پژوهشی در شکل حاضر در سال ۱۳۸۸ صادر کرد. این مجله در سایت های بین المللی ISC و Doaj نیز نمایه شده است. امتیاز این مجله متعلق به دانشگاه شهید چمران اهواز است.

هیأت تحریریه مجله علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری امیدوار است که همکاران محترم در کلیه مراکز علمی و پژوهشی با ارسال مقالات ارزنده علمی و کاربردی خود در تخصص‌های مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، منابع آب، سازه های آبی، هیدرولیک رسوب، محیط زیست آبی، آبخیزداری، آب- هواشناسی (هیدرومتئورولوژی)، هیدرولوژی، آب های زیرزمینی، اقتصاد آب و علوم وابسته به آنها، با این مجله همکاری نموده و در فراهم ساختن زمینه‌ی استمرار و پیوستگی چاپ و انتشار مجله و ارائه خدمات بیشتر و ارزنده تر در نشر علوم مهندسی آب و آبیاری ما را همراهی نمایند. از کلیه بررسی کنندگان مقالات و صاحب نظران که در فرصت های گوناگون با ارائه نظرات اصلاحی خود در بهبود کیفیت مجله نقشی به عهده گرفته اند، صمیمانه سپاسگزاری می نماید.

از همکاران گرامی که نتیجه مطالعات و تحقیقات خود را جهت چاپ و انتشار به این مجله ارسال می نمایند تقاضا می شود که ضوابط تعیین شده (راهنمای تهیه مقاله) را دقیقاً رعایت فرمایند. توجه به ضوابط مجله و رعایت آن از جانب صاحبان مقاله، ضمن جلوگیری از دوباره کارهای زیاد و وقت گیر، موجب تسریع و بهبود کیفیت چاپ مقالات نیز خواهد گردید.

***سردبیر***

**فهرست مطالب**

| عنوان | صفحه |
|---|---|


**ارزیابی روش‌های ترکیب داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی و ماهواره‌ای در تصحیح و بهبود عملکرد داده‌های بارش در سطح حوضه (مطالعه موردی: حوضه آبریز مند)** ۱

علی اسکندری، حیدر زارعی، عبدالرحیم هوشمند و علی محمد آخوندعلی

**بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع یخبندان‌ها در استان اصفهان با استفاده از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم** ۲۱

الهام مظاهری، جهانگیر عابدی کوپایی، منوچهر حیدرپور، محمد جواد زارعیان و سید علیرضا گوهری

**بررسی بازده اقتصادی توزیع آب بر مبنای قیمت تمام شده آب در بخش کشاورزی با استفاده از اصلاح الگوی کشت (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین)** ۳۹

حامد مازندرانی زاده و سیده مرضیه حسینی

**تعیین ضرایب گیاهی یگانه، دوگانه و تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز با استفاده از لایسیمتر بیلان آبی** ۵۹

فاطمه رزاقی، محمد اسماعیلی و علیرضا سپاسخواه

**مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی تبخیر-تعرق مرجع روزانه وتوزیع مکانی آن(مطالعه موردی: استان زنجان)** ۷۷

سیمین گنجه‌ای و امیر حسین ناظمی

**آشکارسازی تغییرات اقلیمی در تبخیر تعرق مرجع در استان کرمانشاه با استفاده از سامانه نیاز آب** ۹۳

مهدی جوزی، نیاز علی ابراهیمی پاک و سید نرگس حسینی

**ارزیابی کیفیت آب رودخانه گاماسیاب با استفاده از شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در دو فصل بهار و تابستان** ۱۱۳

مریم ابراهیمیان نجف آبادی، علیرضا ایلدرمی،ثمر مرتضوی و ابراهیم محمدی‌منش

**بررسی تأثیر سرعتِ کرنش و رطوبت بر مقاومت کششی مستقیم خاک‌های رسی تثبیت شده با بنتونیت، آهک و سیمان** ۱۲۷

مسعود اولی پور، مجید قرینه و سید عبدالله حسینی دهدشتی

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 1-19**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Merging rainfall data of ground and satellite measurements in order to correct and improve the performance of data at the catchment area (Case study: Mond Basin)

A. Eskandari[1], H. Zarei[2]*, A. Hooshmand[3] and A. Akhondali[4]

*1- Graduated with a PhD in water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.*
*2*- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (zareih@scu.ac.ir)*
*3- professor, Department of Irrigation and Drainage, Facualty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.*
*4- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran..*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 17 July 2019
Revised: 14 September 2019
Accepted: 16 September 2019

*Keywords:*
spatial distribution of precipitation, ground rain-gage, satellite precipitation, conditional merging method, Mond basin.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Eskandari, A., Zarei, H., Hooshmand, A., Akhondali, A. M. (2025). 'Merging rainfall data of ground and satellite measurements in order to correct and improve the performance of data at the catchment area (Case study: Mond Basin)', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 1-19. doi: 10.22055/jise.2020.30239.1863.

## Introduction

Estimation of precipitation as one of the most important factors affecting human life and activities is one of the most important issues of interest among decision makers such as water resource managers, farmers, industry owners, and in general, water and climate researchers, especially in arid and semi-arid regions of the world. However, so far, access to real rainfall in the basins, especially the mountainous basins, is a vague and complicated issue. Precise measurements of precipitation in not usually possible in these basins due to environmental conditions and relatively moderate spatial changes in rainfall.

At present, there are various methods and tools for measuring rainfall or estimating it (Barrett, 1970, Rabiei et al., 2013), which includes: 1) Ground rain-gauge stations 2) Ground radars 3) Satellite estimates. But the most common method is to measure rainfall are meteorological radar Cremonini et al, (2015) and ground rain gauge stations (Acquaotta et al., 2016). The ground rain-gauge stations are usually used by sensors or rain measuring devices. They represent direct measurements of rainfall over the ground (precipitation depth), but they are not able to transmit the spatial pattern of precipitation (Huff, 1970). Meteorological radars and satellite data, on the other hand, are capable of recording and estimating rainfall data with high spatial and temporal resolution. However, considering the variable rainfall uncertainties in this type of data, they are not able to

accurately estimate rainfall (Jordan et al. 2000). To solve this inherent problem, there is a need for a methodology that uses all methods of rainfall measurement in the best way. The most commonly used method for reconstructing the precipitation rate with higher accuracy is based on comparison of satellite observations or meteorological radars with ground measurements recorded by rain gauge stations that are spatially dispersed appropriately. In this research, in order to combine and correct the rainfall data, appropriate methods for the integration and correction of rainfall data using rain gauge stations and satellite images at the basin level have been used.

## Materials and methods

A variety of methods have been developed for creating a relationship between rainfall measurement methods at the basin level (Goudenhoofdt and Delobbe, 2009). Currently, Kriging with the correction of satellite-based error or simple Kriging and the conditional merging method Ehret (2002), Sinclair and Pegram (2005) is the most appropriate method for due to the high quality of the results and because of its simplicity and computational efficiency. In this research, the conditional merging method and the methods based on it have been used. In this method, ground rainfall data and satellite data are merged, then information on the expansion of combined data at the basin level are obtained by using Kriging geostatistical methods.

### Conditional merging method

Conditional merging (CM) using a satellite network is in order to estimate ordinary kriging error at the rain gauge and attempt to correct it. First, the satellite values (S) at each station (G) are used to provide kriging KS(g). Then, this field decreases from the initial satellite precipitation to get the error map. Finally, the error value is added to the interpolated values of the rain gauge station by the Kriging KG(g) method (Goudenhoof and Delobbe, 2009). The final formula is expressed by relation (1):

$$CM = S - K_{S(g)} + K_{G(g)} \tag{1}$$

### Bias field conditional merging method

This method is calculated by dividing the initial values of the satellite's precipitation, the interpolated satellite values using the Kriging method, and eventually multiplying it by the result of the Kriging interpolation in the ground station values, which is expressed in terms of relation (2):

$$BFCM = (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)} \tag{2}$$

This method introduces some of the partial problems associated with division by zero or even indefinite forms, but the approach taken in these cases simply assumed that the final value is zero.

## Mean conditional merging

The second method, called the mean conditional merging method, is expressed in terms of relation (3), which represents the average between (CM) and (BFCM).

$$MCM = \frac{S - K_{S(g)} + K_{G(g)} + (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)}}{2} \tag{3}$$

Since all the methods presented here are based on spatial algorithms applying to a set of points, the presence of a compressed rain-gage network provides more accurate results.

**Results and discussion**

The validation process is carried out through the methods used to merge and modify rainfall at the catchment area with the help of rain gauge stations and satellite rainfall values, by comparing the values of images and maps derived from methods based on the conditional merging with observational values of the ground stations using criterion and statistical analysis, the results of which have been presented in Table (1).

According to the results presented in Table (1) and by comparing statistical analyzes based on the results of each method with observational data, all three methods used for merging and correcting rainfall in the catchment area have close and acceptable results and there is a significant correlation with ground data, however, in order to select and propose a suitable method for merging and correcting rainfall with both spatial distribution characteristics and preserving the precipitation rate, it can be said that the conditional merging method has better and more acceptable results and was determined as the appropriate method.

**Table 1- Statistical analysis results of the comparison between estimates of each method and rain gauge observations**

| Rain event | Method | MAE | MBE | RMSE | bais | Pbais | SD | R^2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 93/09/02-05 | CM | 15.11 | -4.18 | 18.58 | -0.07 | -7.03 | 18.10 | 0.98 |
| | BFCM | 15.18 | -4.07 | 18.68 | -0.07 | -6.84 | 18.22 | 0.97 |
| | MCM | 15.13 | -4.12 | 18.62 | -0.07 | -6.93 | 18.16 | 0.98 |
| 93/12/26-27 | CM | 15.96 | -11.31 | 19.99 | -0.35 | -35.21 | 16.39 | 0.98 |
| | BFCM | 15.93 | -11.40 | 20.02 | -0.35 | -35.48 | 16.37 | 0.98 |
| | MCM | 15.94 | -11.35 | 20.00 | -0.35 | -35.34 | 16.38 | 0.98 |
| 94/01/01-03 | CM | 23.40 | -20.50 | 25.48 | -0.91 | -91.12 | 15.25 | 0.98 |
| | BFCM | 23.39 | -20.43 | 25.41 | -0.91 | -90.81 | 15.22 | 0.98 |
| | MCM | 23.40 | -20.46 | 25.44 | -0.91 | -90.96 | 15.23 | 0.98 |
| 94/07/19-20 | CM | 19.24 | 4.31 | 25.22 | 0.09 | 8.90 | 25.02 | 0.99 |
| | BFCM | 19.28 | 4.30 | 25.19 | 0.09 | 8.88 | 24.98 | 0.98 |
| | MCM | 19.24 | 4.30 | 25.20 | 0.09 | 8.88 | 25.00 | 0.99 |
| 94/10/03-05 | CM | 28.67 | 28.08 | 36.59 | 0.64 | 63.67 | 23.62 | 0.99 |
| | BFCM | 28.68 | 28.14 | 37.29 | 0.64 | 63.82 | 24.63 | 0.96 |
| | MCM | 28.67 | 28.11 | 36.91 | 0.64 | 63.75 | 24.08 | 0.98 |

**Conclusion**

The purpose of this study was to modify and improve the performance of rainfall data at the watershed area by using the combination of rainfall and satellite data using geostatistical analysis and merging methods. Accordingly, the statistical analysis criteria had been used for comparing the results of regional rainfall (distributed at the area) by the different merging methods used in the study with observational values of the network of ground stations at the catchment area. The results showed that the regional precipitation values estimated from the conditional merging method provided better results, so that the merged precipitation values retained the precipitation rates of the ground station and has improved the spatial distribution of rainfall on the watershed area relative to the satellite rainfall. In general, this study shows the validity of the conditional merging method for estimating and merging land and satellite data in order to modify regional rainfall in the Mond basin.

**Acknowledgment**

All the respected officials of regional water experts of Fars and Bushehr, thank you for your great cooperation in providing the required information and also Shahid Chamran University of Ahvaz.

**Refrences**

1- Acquaotta, F., Fratianni, S., and Venema, V., 2016. Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. International Journal of Climatology 36,pp. 3963-3974. DOI: 10.1002/joc.4606.

2- Barrett, E. C., 1970. The estimation of monthly rainfall from satellite data. Monthly weather review 98,pp 322-327. DOI: 10.1175/1520-0493(1970)098<0322:TEOMRF>2.3.CO;2.

3- Cremonini, R., Tiranti, D. and Barbero, S., 2015. The urban flooding early warning system of the greater Turin (North-Western Italy) based on weather-radar observations. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* (pp. 837-842). Springer International Publishing.

4- Ehret, U., 2002. Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. *University of Stuttgart, Germany*.

5- Goudenhoofdt, E. and Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(2), pp.195-203.

6- Huff, F.A., 1970. Sampling errors in measurement of mean precipitation. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, pp.35-44.

7- Jordan, P., Seed, A. and Austin, G., 2000. Sampling errors in radar estimates of rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *105*(D2), pp.2247-2257. DOI: 10.1029/1999JD900130.

8- Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M. and Fitzner, D., 2013. Rainfall estimation using moving cars as rain gauges–laboratory experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(11), pp.4701-4712..

9- Sinclair, S. and Pegram, G., 2005. Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, *6*(1), pp.19-22.DOI: 10.1002/asl.85.

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۱۹-۱

# ارزیابی روش‌های ترکیب داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی و ماهواره‌ای در تصحیح و بهبود عملکرد داده‌های بارش در سطح حوضه (مطالعه موردی: حوضه آبریز مند)

علی اسکندری[۱]، حیدر زارعی[۲*]، عبدالرحیم هوشمند[۳] و علی محمد آخوندعلی[۴]

۱- دانش آموخته‌ی دکتری منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران zareih@scu.ac.ir

۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

۴- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

## چکیده

**تخمین دقیق بارندگی در سطح به خصوص در مناطق کوهستانی، به علت تغییرات مکانی بارش، یک مساله مهم به‌شمار می‌آید. روش معمول اندازه‌گیری بارش، اندازه‌گیری مستقیم آن در ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی، تحت عنوان بارش نقطه‌ای است. امروزه برآورد توزیع مکانی بارندگی، با ترکیب اطلاعات حاصل از سنجنده‌های مختلف، مورد توجه قرار گرفته است. نظارت بر رویدادهای شدید بارندگی مستلزم اندازه گیری هر چه دقیق‌تر بارش با استفاده از ترکیب داده‌های راداری و ماهواره‌ای، با مقادیر زمینی است. در این پژوهش به منظور اصلاح داده‌های بارش نقطه‌ای و برآورد توزیع مکانی بارندگی از روش‌های ترکیب وضعیت و برخی از روابط تجربی که براساس آن اجرا می‌شوند در رگبارهای مختلف طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵، در حوضه آبریز مند، واقع در استان‌های فارس و بوشهر در جنوب ایران استفاده شد. براساس تجزیه و تحلیل‌های آماری صورت گرفته بین مقادیر بارش سطح به‌دست آمده از روش‌های ترکیب وضعیت شامل (CM، BFCM و MCM) و بارش مشاهده‌ای شبکه زمینی، روش‌های مورد استفاده به‌طور متوسط به‌ترتیب با میزان RMSE ۲۵/۱۷، ۲۵/۳۲ و ۲۵/۲۳ دقت قابل قبولی دارند. در مقایسه با مقادیر بارندگی به‌دست آمده از روش کریجینگ، نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی دارای تمایل به توزیع مکانی بارندگی شبیه داده‌های ماهواره ای با حفظ مقادیر پارامترهای آماری بارش زمینی می‌باشند به طوری که میانگین بارش مطلوب منطقه‌ای به‌دست آمده از روش ترکیب وضعیت (CM) بسیار شبیه به مقدار به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی است.**

**کلید واژه‌ها:** توزیع مکانی بارش، بارانسنجی زمینی، بارش ماهواره‌ای، روش ترکیب وضعیت، حوضه مند.

## مقدمه

تخمین باران به‌عنوان مهمترین عامل مؤثر بر حیات و فعالیت‌های بشر، یکی از مهمترین موضوعات مورد علاقه‌ی تصمیم سازان از قبیل مدیران منابع آب، کشاورزان، صاحبان صنایع و به‌طور کلی محققان حوضه‌ی آب و اقلیم شناسی به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک جهان بوده است. این در حالی است که تا کنون دسترسی به میزان بارندگی واقعی درسطح حوضه‌ها خصوصاً حوضه‌های کوهستانی به عنوان یک مساله مبهم و پیچیده مطرح است. اندازه‌گیری دقیق باران معمولاً در این گونه حوضه‌ها به‌دلیل شرایط محیطی و تغییرات مکانی نسبتاً شدید بارش، امکان‌پذیر نیست. به همین منظور تجزیه و تحلیل، نظارت و پیش‌بینی رویدادهای شدید مستلزم اندازه‌گیری دقیق میزان بارش است (Zandonadi et al. 2016).

در حال حاضر، روش‌ها و ابزار های مختلفی برای اندازه‌گیری بارش و یا تخمین آن وجود دارد Barrett (1970) ، Rabiei et al (2013) که شامل: ۱) ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی ۲) رادارهای زمینی ۳) برآورد های ماهواره‌های است. در این بین رایج‌ترین روش برای اندازه گیری بارش رادارهای هواشناسی Cremonini et al (2015) و ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی هستند (Acquaotta et al., 2016). در ایستگاه‌های بارانسنجی زمینی معمولا از سنسور یا دستگاه‌های اندازه‌گیری باران استفاده می‌شود. مقادیر به‌دست آمده از آن‌ها نشان دهنده اندازه‌گیری مستقیمی از ریزش باران بر روی زمین (ارتفاع بارش) هستند، اما آن‌ها قادر به انتقال الگوی مکانی بارش نیستند (Huff, 1970). از سوی دیگر رادارهای هواشناسی قابلیت ثبت و برآورد اطلاعات بارش با وضوح زمانی و مکانی بالا را دارند، با این وجود

*DOI:* 10.22055/jise.2020.30239.1863

ممکن است خطاهای عمده‌ای ناشی از ناحیه‌های انسداد و نیاز به کالیبراسیون پارامترهای مورد استفاده باشد (Marshall and Palmer. 1948).

در این زمینه مطالعه‌های انجام شده توسط Goudenhoofdt و Delobbe (2009) نشان می‌دهد رادار هواشناسی با مشکلاتی از قبیل عدم کالیبراسیون الکترونیکی و نیزعدم انعکاس سیگنال خالص بدلیل بازتابش غیر هواشناسی همچنین وجود محدودیت‌های طبیعی از قبیل ارتفاعات در منطقه که مانع بازتابش مناسب امواج خواهند شد، مواجه می باشد. در نهایت، تخمین‌های بارش ماهواره‌ای که عمدتا بر اساس تجزیه و تحلیل‌های خاص حرارتی ابر Scofield (1987)، که از ماهواره های ژئواستاستیکی دریافت شده صورت می‌گیرد و میزان بارش حاصل از ماهواره‌های مدار پایین را افزایش می‌دهد Hsu et al (1997) و Sorooshian et al (2000)، به‌طوری که تخمین‌های بارش در وضوح‌های مکانی و زمانی بالا را فراهم می‌کنند. این نوع از داده‌های سنجش از دوری به‌طور خاص در دست‌یابی به ساختار میدان بارندگی، با هر دو تفکیک مکانی و زمانی مناسب می‌باشند (Doviak et al., 1994). با این حال، با توجه به عدم قطعیت‌های متغیر بارش در این نوع داده‌ها، توانایی برآورد دقیق بارش را ندارند ( Jordan et al. 2000:Vignal and Krajewski 2001). روش معمول برای بازسازی میدان بارندگی با دقت بیشتر، بر اساس مقایسه مشاهده‌های ماهواره‌ای یا رادارهای هواشناسی با اندازه گیری‌های زمینی ثبت شده توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی است که به طور مکانی دارای پراکندگی مناسب هستند. این ارتباط گامی اساسی در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی از قبیل پیش‌بینی هواشناسی Ehret (2002) و مدل‌سازی هیدرولوژیک می‌باشد. (Borup et al., 2016 ؛ Goormans and Willems, 2013)

Guenzi et al. (2017) در تحقیقی به مطالعه و پیاده‌سازی یک برنامه کامپیوتری از روش ترکیب وضعیت با استفاده از زبان R به‌منظور ترکیب داده‌های راداری و مشاهدات زمینی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که برآوردهای بارش در زمان‌های مختلف در منطقه Piedmant (شمال غربی ایتالیا) مورد آزمایش قرار گرفته باعث صحت بهبود مقادیر بارندگی در سطح منطقه شده است.

Sinclair و Pegram (2005) در تحقیقی به ارائه یک برنامه کاربردی برای شبیه‌سازی میدان بارش با استفاده از روش ترکیب وضعیت که از کریجینگ به‌منظور استخراج اطلاعات مطلوب از داده‌های مشاهداتی استفاده می‌کند پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک میدان متوسط بر اساس داده‌های بارانسنجی که با روش کریجینگ درون‌یابی شده است، به‌دست آمده در حالی که جزییات مکانی رادار را حفظ می‌کند و باعث کاهش مقادیر اریبی و حفظ تغییرات مکانی مشاهده‌ای رادار شده است. به‌طوری که واریانس مقادیر برآوردی در مجاورت بارانسنج ها کاهش می‌یابد بنابراین آن‌ها قادر به ارائه اطلاعات مناسبی در مورد مقادیر واقعی بارش در سطح هستند.

Kim et al. (2007) در مطالعه‌ای به‌منظور پیش‌بینی سیلاب در رودخانه Imjin-Ganwha از ترکیب بارش‌های راداری و اندازه گیری شده در ایستگاه‌های بارانسنجی با استفاده از روش ترکیب وضعیت به ارزیابی و تصحیح بارش پرداختند. به‌منظور ارزیابی این روش، آمار و هیتوگراف بارش‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه و استفاده از داده‌های راداری بارش ساعتی را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بارش برآوردی با روش ترکیب وضعیت نتایج بهتری را در آمار کمی و کیفی ارائه می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر توسط Pignone et al (2015) به‌منظور برآورد یک بارش زمینه با ترکیب کردن داده‌های سنجش از دوری و مشاهدات باران‌سنجی با استفاده از روش ترکیب وضعیت ساده شده یک روش جدید برای ترکیب داده‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها در این پژوهش به مطالعه بهبود یک الگوریتم برمبنای روش ترکیب وضعیت پرداختند که می‌تواند در یک زمان واقعی به منظور تولید نقشه‌های بهینه بارش استفاده شود. Fang et al (2019) در مطالعه‌ای عملکرد داده‌های اندازه‌گیری بارش ماهواره TRMM و GPM در برآورد بارش های شدید و حداکثر میزان بارندگی سالانه برای دوره های۲۰۱۷-۲۰۰۰ و ۲۰۱۷-۲۰۱۴ در سراسر چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو محصول تخمین خوبی از بارندگی‌های شدید ارائه داده و داده‌های GPM کمی بهتر عمل کرده است. در ضمن عملکرد ماهواره در جنوب و شرق چین با آب و هوای موسمی مرطوب، بهتر از غرب چین با ارتفاع زیاد و اقلیم خشک بوده و نشانگر تأثیر قابل توجهی از توپوگرافی و آب و هوا بر کیفیت داده های ماهواره‌ای می‌باشد. Mahmoud et al. (2019) در تحقیقی صحت سه محصول اولیه، بازنگری شده و نهایی GPM در امارات متحده عربی با استفاده از ارزیابی های مکانی و زمانی چندگانه در دوره ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که محصول نهایی بهترین تخمین نسبت به دو محصول دیگر را دارد. براساس این نتایج، محصول نهایی GPM نه تنها درک بهتری از تغییرپذیری و الگوی بارندگی در امارات متحده عربی ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک محصول مطمئن برای تکمیل و یا جایگزینی ایستگاه‌های اندازه گیری بارش های در مناطق فاقد ایستگاه باشد.

با توجه به اینکه تاکنون در سطح حوضه آبریز در کشور روش‌های مختلف ترکیب داده های بارش زمینی و ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار نگرفته است، در تحقیق حاضر به‌منظور ترکیب و تصحیح داده‌های بارش و افزایش عملکرد و دقت داده‌های بارش در سطح حوضه از روش‌های مناسب تلفیق و ت‌صحیح داده‌های بارش به کمک ایستگاه‌های باران‌سنجی و اطلاعات مستخرج از الگوریتم داده‌های سلولی ماهواره‌ای در سطح حوضه آبریز مند استفاده شده است.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز مند در جنوب غرب کشور قرار دارد. وسعت این حوضه ۴۷۸۰۲ کیلومتر مربع می باشد.این حوضه بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان بوده که به لحاظ تقسیمات کشوری از این گستره در حدود ۸۳ درصد در استان فارس و ۱۷ درصد در استان بوشهر قرار گرفته است. مختصات این حوضه حد فاصل ۴۸

درجه و ۸ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۹ دقیقه عرض شرقی و از ۲۷ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت کل دشت‌های حوضه آبریز ۱۱۰۰۰ کیلومتر مربع با بارندگی متوسط ۲۶۰ میلی‌متر و مساحت کل ارتفاعات آن ۳۶۸۰۰ کیلومتر مربع با بارش متوسط ۳۲۰ میلیمتر می‌باشد. این حوضه آبریز در ناحیه اقلیمی گرم و خشک با متوسط درجه حرارت ۲۹ درجه سانتی‌گراد قراردارد. ارتفاع حوضه از پنج متر در ساحل خلیج فارس تا ۳۲۰۰ متر در ارتفاعات می‌باشد (شکل ۱). تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و خشک از مشخصات اصلی آب و هوایی حوضه است. بیشتر ریزش‌های جوی به‌صورت باران و در فصل پاییز از اوایل آذر ماه تا بهار وابتدای فروردین ماه می‌باشند. در شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز و ایستگاه‌های بارانسنجی در منطقه در استان و ایران نشان داده شده است.

### داده‌های ایستگاه بارانسنجی زمینی

بارش مشاهده‌ای در سطح حوضه توسط شبکه ایستگاه‌های باران سنجی اندازه‌گیری می شود. در این تحقیق از تداوم داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های زمینی در طی سال‌های آماری ۹۵-۹۳ برای استفاده در روش‌های ترکیب و تصحیح اطلاعات ماهواره ای که توسط ۷۷ ایستگاه باران‌سنجی در سطح و مجاور حوضه مند شکل (۱) به‌دست آمده، استفاده شد. ایستگاه‌های موجود در حوضه شامل هفت ایستگاه سینوپتیک، متعلق به اداره کل هواشناسی استان‌های فارس و بوشهر که به جهت کنترل کیفی مورد اعتماد بیشتری هستند و ۷۰ ایستگاه بارانسنجی معمولی که تحت نظارت شرکت‌های آب منطقه‌ای فارس و بوشهرکه مسئول نگهداری و کنترل کیفیت داده ها می‌باشند، استفاده شد.

### داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق براساس داده‌های تولید شده از ماهواره Global Precipitation Measurement می‌باشد که ماموریت اندازه‌گیری بارندگی جهانی را به عهده دارد و متشکل از شبکه‌ای بین المللی از ماهواره‌هاست که نسل بعدی مشاهدات باران و برف را فراهم می‌کند. این ماموریت که بر پایه موفقیت ماهواره‌ی Tropical Rainfall Measuring Mission بنا شده، با به کارگیری یک ماهواره‌ی اصلی و مرکزی که یک سیستم رادیومتر و رادار پیشرفته را حمل می‌کند به اندازه‌گیری بارندگی از فضا می‌پردازد و به‌عنوان یک استاندارد مرجع برای تلفیق اندازه‌گیری‌های بارندگی از مجموعه‌ای از ماهواره‌های تحقیقاتی عملیاتی، عمل می‌کند. GPM که به‌وسیله ناسا و آژانس هوا فضای ژاپن به‌عنوان جانشین جهانی TRMM آغاز شد، از کنسرسیومی از آژانس‌های فضایی بین المللی مانند سازمان اروپایی استفاده از ماهواره‌های هواشناسی، نووآ و سازمان فضایی هند تشکیل شده است. ماهواره اصلی GPM در ۲۷ فوریه‌ی سال ۲۰۱۴ از مرکز فضایی تانگاشیما ژاپن به فضا پرتاب شد. این ماهواره اولین رادار بارندگی دو فرکانسه $(Ku/Ka)$ فضایی را حمل می‌کند. اطلاعات ارائه شده توسط GPM بر پایه الگوریتم تجمیع داده‌های چند ماهواره‌ای GPM یا (IMERG) تولید و منتشر می‌شود. این اطلاعات در وضوح زمانی نیم ساعته، با ابعاد مکانی ۰/۱ در ۰/۱ درجه و با پوشش تقریباً جهانی در سایت https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov به سهولت در دسترس قراردارد. (جدول ۱).

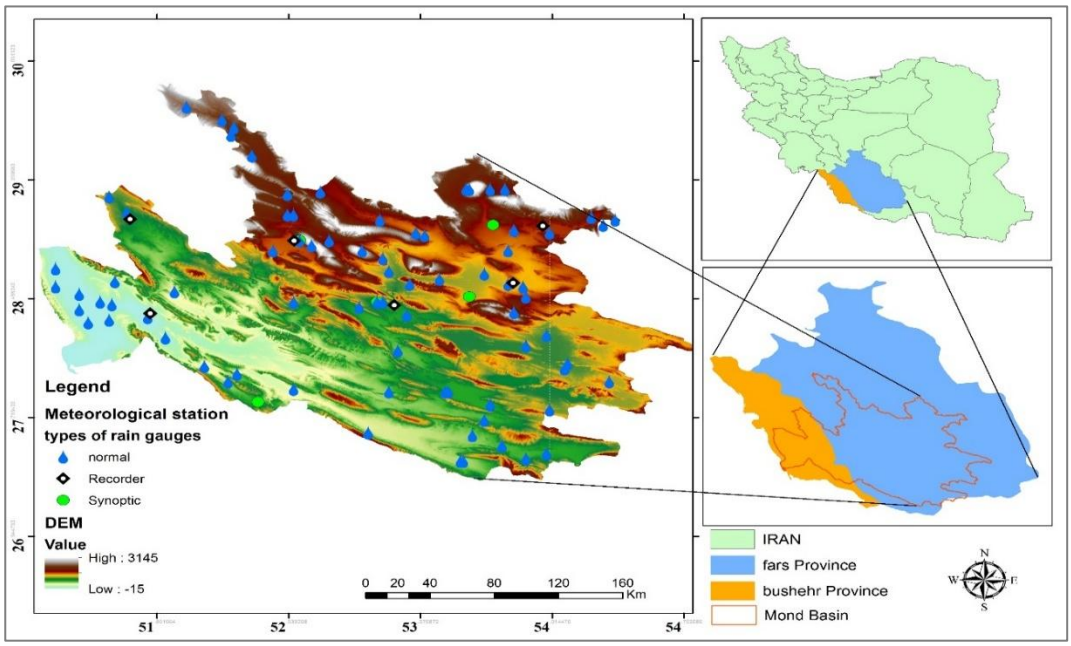



**Fig. 1- Location of the study area and used meteorological stations**

**شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده**

*DOI:* 10.22055/jise.2020.30239.1863

**جدول ۱- خلاصه اطلاعات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق**
**Table1-Summary of satellite data used in the study**

| Variable | Temporal scale | Spatial Resolution | Spatial coverage | Time of data generation | Reference data generation |
|---|---|---|---|---|---|
| GPM-3IMERG | Daily | 0.1° | 60 ° North- 60 ° South | March 2014-now | NASA-JAXA |

**روش‌های ترکیب و تصحیح داده‌های بارش**

به‌منظور ایجاد یک ارتباط بین روش‌های اندازه‌گیری بارش در سطح حوضه، از روش‌های متنوعی که به‌همین منظور توسعه داده شده است استفاده می‌شود (Goudenhoofdt and Delobbe, (2009. در حال حاضر با اصلاح خطای مبتنی بر ماهواره‌ها با کریجینگ ساده و روش ترکیب وضعیت(Conditional Merging) به‌دلیل کیفیت بالای نتایج و به دلیل سادگی و کارایی محاسباتی، مناسب‌ترین روش است (Ehret 2002، Sinclair and Pegram 2005). در این تحقیق از روش ترکیب وضعیت و روش‌های مبتنی بر آن که در ابتدا توسط Ehret (2002) و در ادامه توسط Sinclair و Pegram (2005) توسعه یافت، استفاده شده است. در این روش داده‌های بارش اندازه‌گیری شده زمینی و داده‌های ماهواره ترکیب شده سپس به کمک روش‌های زمین‌آماری کریجینگ اطلاعاتی از گسترش داده‌های ترکیب شده در سطح حوضه مورد مطالعه به‌دست می‌آید.

**روش زمین آماری کریجینگ**

کریجینگ یکی از تخمینگرهای رایج در روش زمین‌آماری در کنار سایر تخمینگرهای دیگر است که براساس آن می‌توان کمیت یک نقطه مجهول را با استفاده از کمیت نقاط معلوم تخمین زد. این روش توسط کریجینگ در سال ۱۹۶۶ مطرح و توسط ماترون در سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۱ بسط و گسترش یافته است .

کریجینگ یک روش تخمین است که بر اساس میانگین متحرک وزن‌دار (Weighted Moving Average) استوار است و در مورد آن می‌توان گفت که بهترین تخمین‌گر خطی نا اریب است. در واقع در این روش برای هر یک از نمونه‌ها وزن آماری مشخصی به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که واریانس تخمین مبتنی بر آن‌ها حداقل باشد. در روش کریجینگ هر چقدر نمونه در فاصله دورتری قرار داشته باشد، به همان نسبت وزن آماری که به آن نسبت داده می‌شود، کمتر است. اما در عین حال موقعیت نمونه نیز مد نظر قرار می‌گیرد. از مهمترین ویژگی‌های کریجینگ آن است که به ازای هر تخمین، خطای مرتبط به آن را می‌توان محاسبه کرد. بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد، در حالی که در روش‌های کلاسیک معمولاً چنین امکانی وجود ندارد (Madani 1995). بر اساس آنچه در روش فاصله معکوس وزنی (IDW) که در آن نزدیکی به نقاط نمونه به‌عنوان وزن برآورد محسوب می‌شد، در کریجینگ نیز واریانس فضایی تابعی از فاصله شناخته می‌شود. برای برآورد مقادیر براساس کریجینگ روش‌های مختلفی وجود دارد، دراین تحقیق از روش کریجینگ معمولی استفاده شده است.

کریجینگ معمولی Isaaks و Srivastava (1989) ، Krige (1951)، Oliver و Webster (1990) یک روش رگرسیون خطی است که عمدتاً در تجزیه‌و تحلیل زمین آماری استفاده می‌شود و این امکان را می‌دهد که با درون‌یابی، مقادیر میانگین مربعات خطا را به حداقل رساند. ایده اصلی این است که اگر در بعضی نقاط معیار شناخته شده‌ای (مقادیر معلوم) وجود داشته باشد، می‌توان ارزش سایر نقاط همسایه را تعیین کرد که در آن هیچ گونه اطلاعاتی موجود نیست. این درون‌یابی مکانی براساس وابستگی خودکار (یا وابستگی مکانی) یک متغیر است، به این ترتیب که نزدیک‌ترین نقاط بیشتر از نقاطی که در فواصل دورتری از متغیر قرار می گیرند مشابه هستند. مقدار مجهول در یک نقطه خاص با یک میانگین وزنی از مقادیر معلوم محاسبه می‌شود. وزن‌ها به رابطه مکانی بین مقادیر اندازه‌گیری شده در محدوده نقطه مجهول بستگی دارد. برای محاسبه وزن‌ها، یک نیمه واریوگرام به‌کار می‌رود: یک گراف که فاصله بین دو نقطه و مقدار تقریبی واریانس را بین اندازه‌گیری های انجام شده در این دو نقطه مرتبط می‌کند. این نیمه واریوگرام در هر دو نقطه به روش کیفی و کمی، درجه خود همبستگی را نشان می‌دهد. روش عمومی محاسبه کریجینگ براساس رابطه (۱) می‌باشد.

$$z^*(x_0)=\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot z(x_i)$$
$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \qquad (۱)$$

در این رابطه $z^*(x_0)$ مقدار برآورد شده در نقطه $x_0$ ، $w_i$ وزن و $z(x_i)$ مقادیر نمونه می‌باشد.

وزن‌ها به درجه همبستگی بین نقاط نمونه و نقاط برآورد شده بستگی دارد و همیشه جمع آن‌ها برابر با یک است. این نوع کریجینگ را خطی گویند زیرا ترکیب خطی از N داده است.

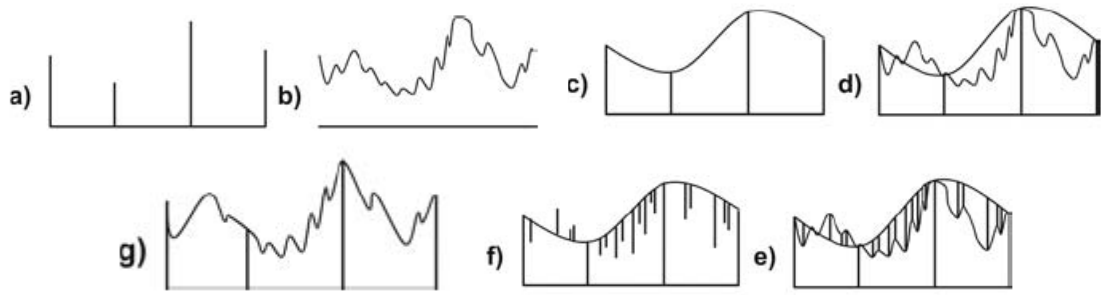



**Fig. 2-Merging rain gauge and satellite data principal steps.**
**شکل ۲- گام‌های ترکیب داده‌های ایستگاه بارانسنجی و ماهواره‌ای**

**روش ترکیب وضعیت (CM)**

این روش با هدف ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با اطلاعات باران‌سنجی، که براساس فرآیند کریجینگ معمولی است. می‌تواند به بسیاری از مهندسین و محققان در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی (هواشناسی، رادار، هیدرولوژی و بسیاری دیگر) کمک کند.

ترکیب وضعیت (CM) با استفاده از شبکه ماهواره‌ای برای برآورد خطای مربوط به کریجینگ معمولی در ایستگاه باران‌سنجی و تلاش برای اصلاح آن است. اولاً، مقادیر ماهواره‌ای (S) در هر ایستگاه (G) برای تهیه کریجینگ استفاده می‌شود $K_{R(g)}$. سپس، مقادیر برآوردی از بارش ماهواره اولیه کم می‌شود تا نقشه خطا را به‌دست آورد. در نهایت، مقدار خطا به مقادیر درون‌یابی شده ایستگاه باران‌سنجی با روش کریجینگ $K_{G(g)}$، افزوده می‌شود (Goudenhoof and Delobbe, 2009). از این نظر می‌تواند مهم باشد که ممکن است در یک سلول مقداری توسط ایستگاه باران‌سنجی از دست رفته باشد اما در برداشت‌های ماهواره‌ای دیده شود. فرمول نهایی با رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$CM = S - K_{S(g)} + K_{G(g)} \qquad (۲)$$

شکل (۲) گام‌های تجربی از روش فوق را نشان می‌دهد. در روابط (۳) تا (۹) فرآیند تعیین ساختار خطای تخمین از داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از روش ترکیب وضعیت ارائه شده است.

شکل (a-۲) :داده‌های اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی است که به‌صورت داده‌های نقطه‌ای بیان می‌شوند. شکل (b-۲) :داده‌های سلولی ماهواره‌ای که به صورت شبکه‌بندی شده و منظم در سطح حوضه استخراج و ارائه شده است. شکل (c-۲) :داده‌های نقطه‌ای زمینی شکل (a-۲) با به‌کارگیری روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری نظیر کریجینگ به‌منظور دست‌یابی به بهترین تطابق با داده‌های سلولی ماهواره‌ای، توسعه می‌یابند. شکل (d) :داده‌های سلولی ماهواره‌ای صرفاً در محل‌هایی که داده‌های نقطه‌ای زمینی وجود دارند، با به‌کارگیری روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری نظیر کریجینگ توسعه می‌یابند. شکل (e-۲) : در هر سلول از شبکه کلی، تفاوت بین مقدار داده سلولی (به‌دست آمده از روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری) و مقدار مشاهده شده آن (ماهواره‌ای) محاسبه می‌شود. شکل (f-۲) :مقادیر به‌دست آمده از (e) به مقادیر به‌دست آمده از (b) اعمال می‌شوند. شکل (g) :توزیع مکانی بارش با ترکیب داده‌های نقطه‌ای میان یابی شده به روش‌های زمین‌آماری و مقادیر خطای به‌دست آمده و نیز توجه به ساختار توزیع خطای داده‌های سلولی، تعیین می‌شوند.

$$Z(s) = G_K(s) + \varepsilon_G(s) \qquad (۳)$$

$$S(s) = S_K(s) + \varepsilon_S(s) \qquad (۴)$$

$$M(s) = G_K(s) + \varepsilon_S(s) \qquad (۵)$$

$$\varepsilon_G(s) = Z(s) - G_K(s) \qquad (۶)$$

$$\varepsilon_S(s) = S(s) - S_K(s) \qquad (۷)$$

$$E\left[Z(s) - M(s)\right] = E\left[\varepsilon_G(s) - \varepsilon_S(s)\right] \qquad (۸)$$

$$\begin{aligned} Var\left[Z(s) - M(s)\right] &= E\left\{\left[\varepsilon_G(s) - \varepsilon_S(s)\right]^2\right\} \\ &= \mathrm{var}\left[\varepsilon_G(s)\right] + \mathrm{var}\left[\varepsilon_S(s)\right] \\ &- 2\,\mathrm{cov}\left[(\varepsilon_G(s))(\varepsilon_S(s))\right] = \beta(1-\rho) \end{aligned} \qquad (۹)$$

در روابط بالا، $Z(s)$ مقدار باران واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی در مکان S ، $G_K(s)$ مقادیر میان‌یابی شده با روش‌های زمین‌آماری بر مبنای مقادیر باران واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی، $S(s)$ مقادیر باران سلولی مشاهده شده توسط ماهواره، $S_K(s)$ مقادیر میان‌یابی شده باران سلولی در مکان‌های که باران واقعی زمینی اندازه‌گیری شده وجود دارد و $M(s)$ تخمین تلفیقی از باران $Z(s)$ می‌باشند. پارامتر $\varepsilon_G(s)$ در معادله(۶) به‌دلیل نامعلوم بودن مقدار $Z(s)$ مجهول است در حالی که $\varepsilon_S(s)$ در معادله (۷) معلوم بوده و با کاربرد معادله (۵)

*DOI:* 10.22055/jise.2020.30239.1863

می‌توان مقدار $M(s)$ را که در واقع اندازه‌ای از مقدار $Z(s)$ می‌باشد را، محاسبه کرد. همچنین معادله (۸) نشان می‌دهد چنانچه مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده دارای توزیع گوسی باشند، چون در این حالت مقادیر میان‌یابی شده بدون بایاس می‌باشند، بنابراین امید ریاضی خطای تخمین(تفاوت مقادیر ترکیبی و واقعی) صفر خواهد بود. واریانس خطای تخمین نیز بر اساس معادله (۹) محاسبه شده و می‌تواند به اجزای آن مطابق روابط معادله (۶) و (۷) تجزیه شود. واریانس خطای تخمین تلفیقی در نقاط اندازه‌گیری زمینی(محل باران‌سنج‌ها) صفر است در حالی‌که در دیگر محل‌ها مقداری محدود به حداکثر یعنی مقدار $\beta$ برای ضریب همبستگی‌های مثبت($\rho >$ ۰) بین $\varepsilon_G(s)$ و $\varepsilon_S(s)$ است. از طرفی چنانچه $\varepsilon_G(s)$ و$\varepsilon_S(s)$ دارای همبستگی قوی و مثبت هستند، این انتظار وجود دارد که مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی و مقادیر سلولی ماهواره‌ای یکسان و برابر $Z(s)$ باشند. در آن‌صورت مطابق معادله (۹) ،واریانس خطای تخمین تلفیقی به‌طور معنی داری کمتر از $\beta$ خواهد بود.

با تکیه بر رابطه (۲)، دو روش تجربی نیز براساس آن اجرا می شود که از همان منطق استفاده می‌کنند اما در زمینه‌های خطا (تفریق) کار نمی‌کنند، بلکه در زمینه مقادیر تخمینی (تقسیم) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### روش ترکیب وضعیت مرتبط با اریبی (BFCM)

این روش با تقسیم مقادیر اولیه بارش ماهواره‌ای بر مقادیر درون یابی شده ماهواره‌ای با استفاده از روش کریجینگ و در نهایت ضرب نمودن آن به نتیجه حاصل از دورن‌یابی کریجینگ مقادیر ایستگاه زمینی محاسبه می‌گردد، که به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود:

$$BFCM = (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)} \qquad (۱۰)$$

این روش برخی از مشکلات جزئی مربوط به تقسیم را با اشکال صفر یا حتی نامعین معرفی می‌کند، اما رویکردی که در این مورد اتخاذ شده، صرفا فرض صفر بودن مقدار نهایی است.

### روش ترکیب وضعیت متوسط (MCM)

روش سوم، روش ترکیب وضعیت متوسط MCM نامیده می‌شود براساس رابطه (۱۱) بیان می‌شود که نشان‌دهنده متوسط بین (CM) و (BFCM) است.

$$MCM = \frac{S - K_{S(g)} + K_{G(g)} + (\frac{S}{K_{S(g)}})K_{G(g)}}{2} \qquad (۱۱)$$

از آنجای‌که تمام روش‌های ارائه شده در اینجا بر الگوریتم‌های مکانی که بر روی مجموعه‌ای از نقاط اعمال می‌شوند، تکیه می‌کنند، داشتن شبکه متراکم بارانسنجی نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد، هم چنین می‌تواند با حداقل تعداد ایستگاه بارانسنجی نیز مورد بررسی قرار گیرد. زیرا یک تنوع دقیق (و نیمه واریوگرام نسبی که به روش کریجینگ اعمال شده است) می‌تواند به‌صورت یک شبکه پراکنده اصلاح شود (Journel and Huijbregts 1978، Pannatier 2012).

### معیارهای ارزیابی آماری مورد استفاده

به‌طور کلی خطای پیش‌بینی شامل دوجزء خطای سیستماتیک و خطای تصادفی می باشد. برای ارزیابی کارکرد مدل مورد نظر لازم است که خطای پیش‌بینی اندازه‌گیری گردد. خطای تخمین عبارت از تفاوت بین مقدار تخمینی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. لازم به یادآوری است چنین محاسباتی در واقع فقط میزان انحراف محاسباتی از مقدار مشاهداتی را نشان داده و خطای نهفته در سیستم محاسبه و مشاهده را نشان نمی‌دهد (AghaKouchak et al. 2012).

به‌منظور تعیین دقت، روش‌های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. در این تحقیق برای ارزیابی میزان دقت و انتخاب بهترین روش، از آنالیز و معیارهای آماری مختلفی مانند میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ونیز شاخص‌های دیگری نظیر شاخص درصد خطای اریبی (PBIAS)، واریانس و ضریب همبستگی استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این معیارها در روابط (۱۲) تا (۱۵) ارائه شده است.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Z^*(x_i) - Z(x_i)\right| \qquad (۱۲)$$

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Z^*(x_i) - Z(x_i)\right) \qquad (۱۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n}} \qquad (۱۴)$$

$$PBAIS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i) - Z(x_i))}{\sum_{i=1}^{n} Z(x_i)} \times 100 \qquad (۱۵)$$

که : $Z^*(x_i)$:مقدار برآورد شده $x_i$، $Z(x_i)$: مقدار مشاهده شده $x_i$ و $n$: تعداد داده‌ها می‌باشد.

در این روابط میانگین خطای مطلق (MAE) معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست که هر چه به صفر نزدیکتر باشد، بهتر است. مقدار میانگین خطای انحراف (MBE) اریبی را نشان می دهد و نشان‌گر میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده‌ای است و در حالت ایده‌آل بایستی مساوی صفر باشد. مقادیر مثبت یا منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده برآورد بیشتر (Overestimate) یا کمتر

(Underestimate) از مقدار واقعی می‌باشد. در عمل هیچگاه مقدار این دو آماره صفر نخواهد شد. مقدار میانطای شاخص درصد خطای اریبی یا (PBIAS) نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده تا چه اندازه تمایل به بزرگتر یا کوچکتر بودن از مقادیر مشاهده شده دارند. این مقدار هرچه به سمت صفر میل کند نشانه دقت بهتر محاسبات بوده و مقدار برابر صفر نشان‌دهنده بهترین برازش می‌باشد. مثبت بودن این شاخص بیان‌گر برآورد بیشتر از واقعیت و منفی بودن آن بیان‌گر برآورد کمتر از واقعیت است. شاخص میزان همبستگی ($R^2$)، رابطه خطی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. نزدیک شدن شاخص به عدد یک بیانگر همبستگی بالا و در صورت همبستگی پایین بین دو دسته از اعداد، این شاخص به سمت صفر میل می‌کند.

## نتایج و بحث

پس از بررسی مقادیر بارش اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه باران‌سنجی در سطح حوضه آبریز حوضه مند در طول سال‌های آماری مورد مطالعه تعداد سه واقعه بارش در سال آماری ۹۴-۹۳ و تعداد دو واقعه بارش در دوره آماری سال ۹۵-۹۴ به عنوان بارندگی های متداوم روزانه به‌منظور بررسی هدف مطالعه انتخاب شد. به‌صورتی که شاخص انتخاب بارش‌ها فراگیر بودن آن‌ها می‌باشد. با انتخاب تداوم بارش ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی مقادیر بارش ماهواره‌ای این تداوم‌ها در روزهای مورد نظر نیز از پایگاه مربوط دریافت شد. در جدول (۲) مشخصات آماری هریک از تداوم‌های بارش مورد بررسی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری دورن‌یابی شده و ماهواره‌ای در طی دوره آماری مورد بررسی نشان داده شده است.

باتوجه به مشخصات آماری ارائه شده از مقادیر بارش مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی و مقادیر بارش برآوردی ماهواره‌ای در جدول (۲)، نشان می‌دهد که در تداوم‌های مربوط به فصولی که ریزش‌های جوی عمدتا به‌صورت بارش اتفاق می‌افتد بارش مشاهداتی زمینی و ماهواره‌ای دارای مقادیر نزدیک بهم می‌باشند. اما در همه تداوم‌های مورد استفاده مقادیر بارش ماهواره کمتر از مقادیر بارش ایستگاه‌های زمینی بود.

به‌همین منظور نیز مقایسه توزیع مکانی بارش در اشکال (۳) تا (۷) برای مقادیر بارش ماهواره‌ای (GPM Rainfall)، کریجینگ ایستگاه‌های باران‌سنجی (Gauge Rainfall) و بارش ترکیب شده برای هریک از روش‌های ترکیب (CM، BFCM، MCM) در هریک از تداوم‌های مورد بررسی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها بر می‌آید، با مقایسه هریک از روش‌های ترکیب و تصحیح بارش با مقادیر بارش ماهواره‌ای و مقادیر بارش ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد که هر دو ویژگی مربوط به تغییرات مکانی توزیع بارش ماهواره‌ای و مقدار ارتفاع بارش ایستگاه‌های زمینی را دارند. به‌طوری که روش‌های ترکیب به‌منظور تصحیح داده‌های بارش ماهواره‌ای ارتفاع بارش را ثابت حفظ کرده و تغییرات مکانی بارش را بهبود بخشیده است. به‌طور خاص این نتیجه در شکل (۳) برای تداوم بارش آبان به چشم می‌خورد که روش ترکیب وضعیت مقادیر عمق بارش را ثابت نگه داشته و توزیع تغییرات مکانی را نسبت به بارش ماهواره‌ای در سطح حوضه را بهبود بخشیده است. به‌طور کلی برآورد بارش ماهواره‌ای کمتر از مقادیر بارش مشاهداتی ایستگاه‌های باران سنجی و مقادیر بارش اصلاح و ترکیب شده در سطح حوضه می‌باشد.

**جدول ۲- مشخصات آماری بارش ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای در تداوم‌های مورد بررسی در حوضه آبریز مند (میلیمتر)**

**Table 2- Statistical Characteristics of the gauge and satellite rainfall in Mond basin (mm)**

| Statistical Period | Rain event | Paramter | Max | Mean | Min | SD | CV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2014-2015 | 11/23/2014-11/26/2014 | Gauge Rainfall | 94.43 | 51.62 | 18.96 | 17.93 | 0.35 |
| | | GPM Rainfall | 51.95 | 37.52 | 7.51 | 8.39 | 0.22 |
| | 03/17/2015-03/18/2015 | Gauge Rainfall | 59.27 | 38.56 | 10.19 | 11.81 | 0.31 |
| | | GPM Rainfall | 58.89 | 35.95 | 15.45 | 10.22 | 0.28 |
| | 06/22/2015-06/24/2015 | Gauge Rainfall | 86.93 | 19.60 | 1.74 | 10.42 | 0.53 |
| | | GPM Rainfall | 37.58 | 17.2 | 5.12 | 6.28 | 0.37 |
| 2015-2016 | 10/11/2015-10/12/2015 | Gauge Rainfall | 138.80 | 51.36 | 1.09 | 21.98 | 0.43 |
| | | GPM Rainfall | 83.89 | 42.75 | 0.97 | 20.36 | 0.48 |
| | 12/31/2015-01/03/2016 | Gauge Rainfall | 132.59 | 35.52 | 4.80 | 17.64 | 0.50 |
| | | GPM Rainfall | 51.49 | 24.4 | 2.75 | 7.47 | 0.31 |

*DOI:* 10.22055/jise.2020.30239.1863

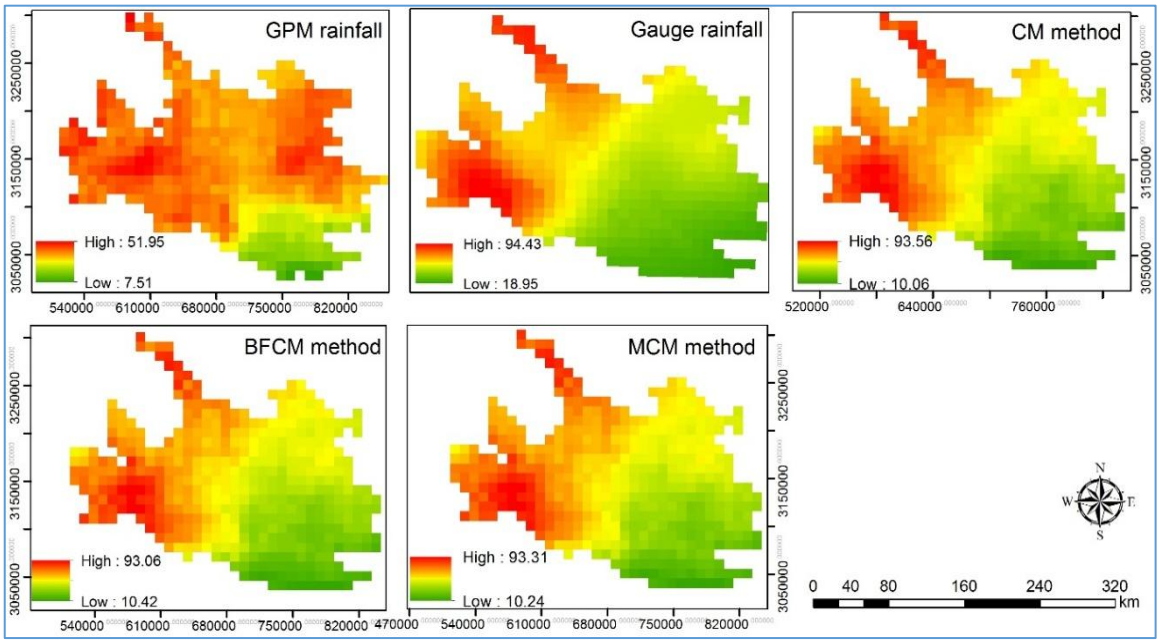



**Fig. 3- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (11/23/2014-11/26/2014)**

**شکل ۳- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۳/۰۹/۰۲ تا ۹۳/۰۹/۰۵**

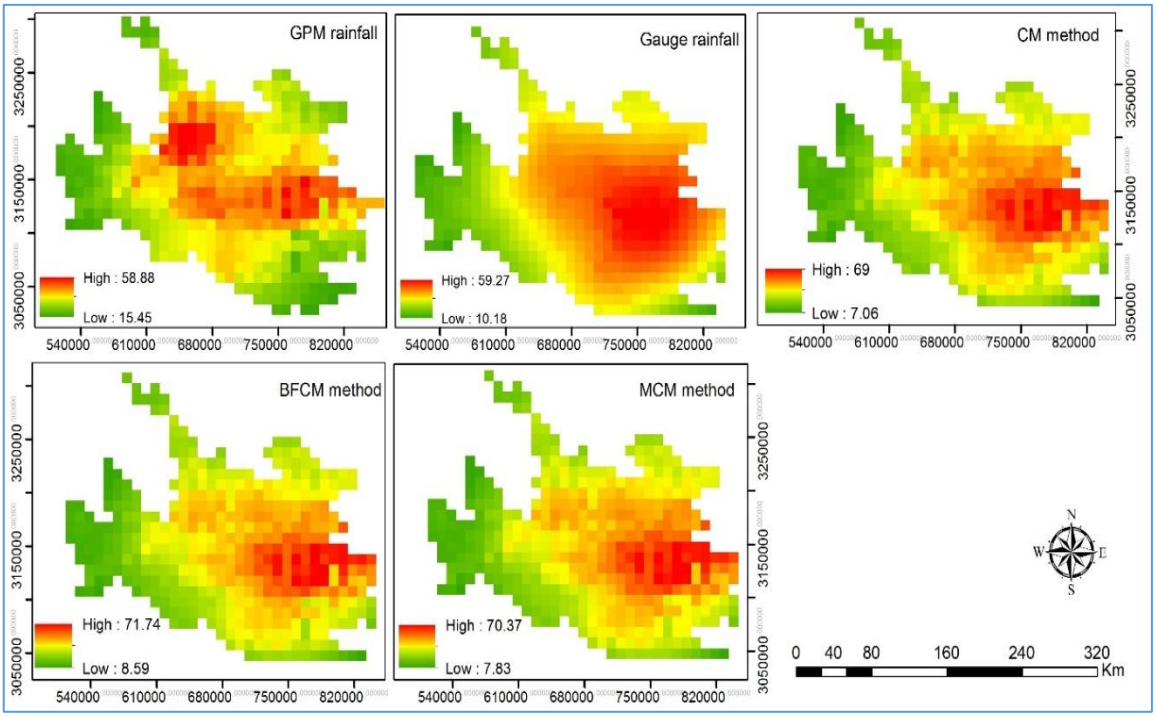



**Fig. 4- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (3/17/2015-3/18/2015)**

**شکل ٤- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۳/۱۲/۲٦ تا ۹۳/۱۲/۲۷**

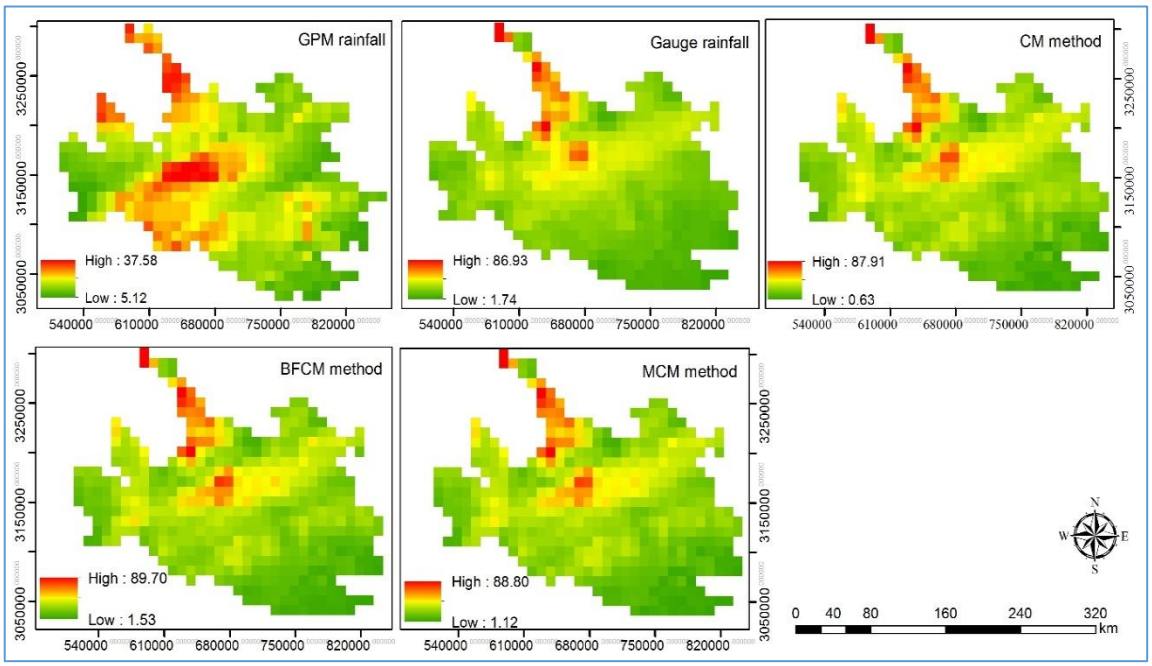



**Fig. 5- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (6/22/2015-6/24/2015)**

**شکل ۵- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۴/۰۱/۰۱ تا ۹۴/۰۱/۰۳**

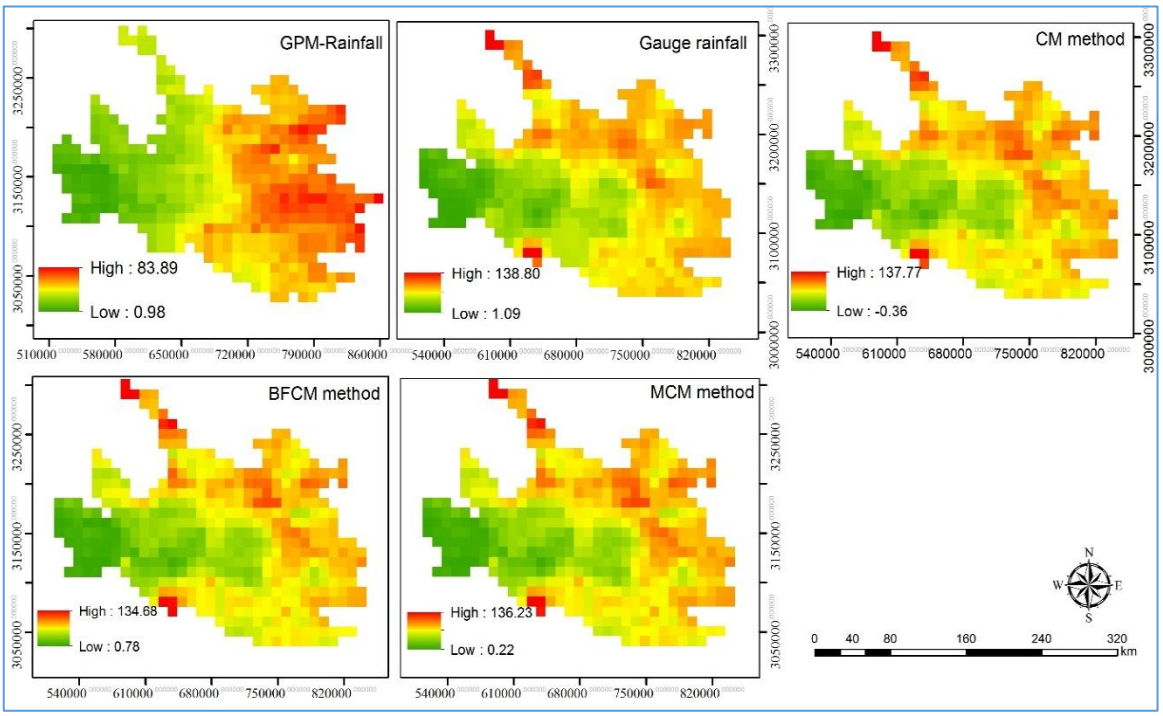



**Fig. 6- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (10/11/2015-10/12/2015)**

**شکل٦- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹۴/۰۸/۱۹ تا ۹۴/۰۸/۲۰**

*DOI:* 10.22055/jise.2020.30239.1863

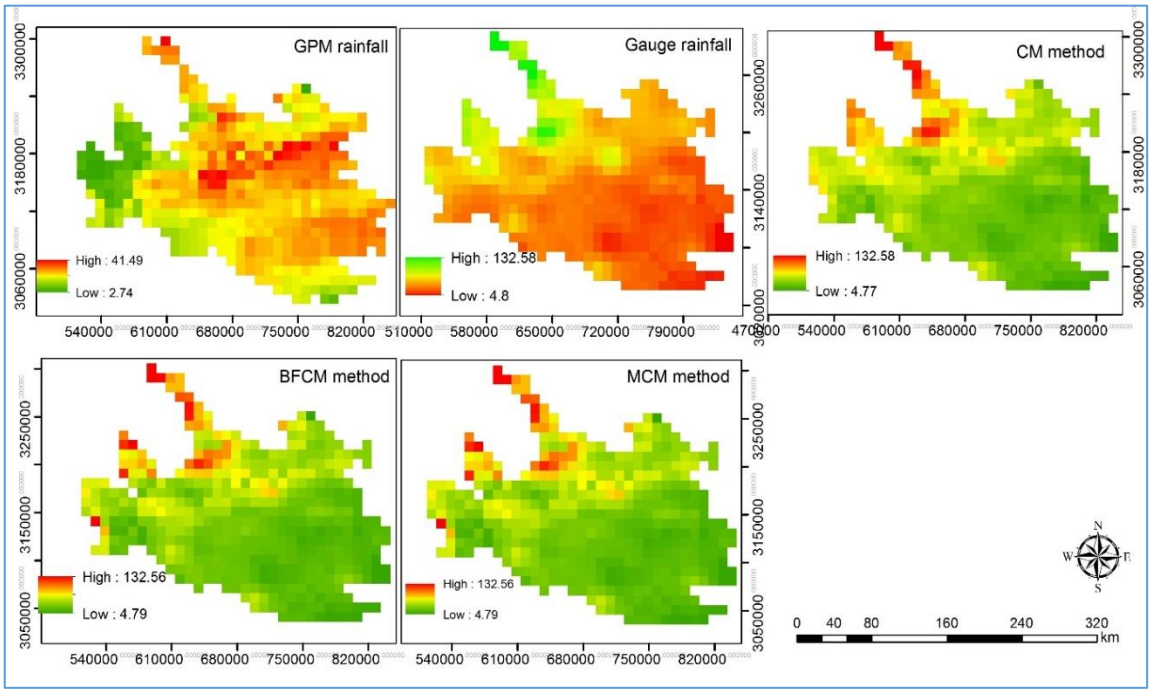



**Fig. 7- Comparison of rainfall distribution at the basin for rainfall events (12/31/2015-01/03/2016)**

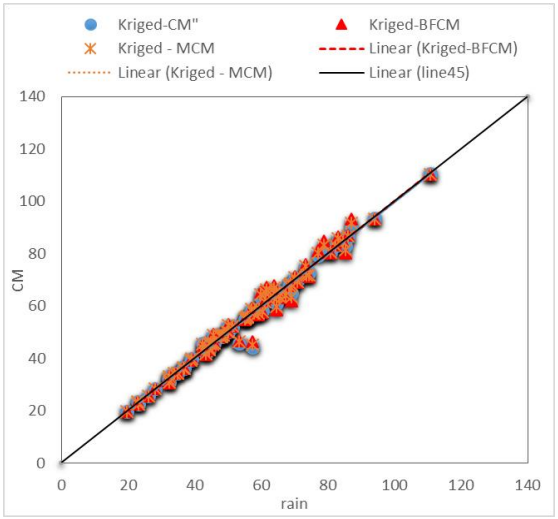
**شکل۷- مقایسه توزیع بارش در سطح حوضه آبریز برای تداوم بارش از ۹٤/۱۰/۱۰ تا ۹٤/۱۰/۱۳**

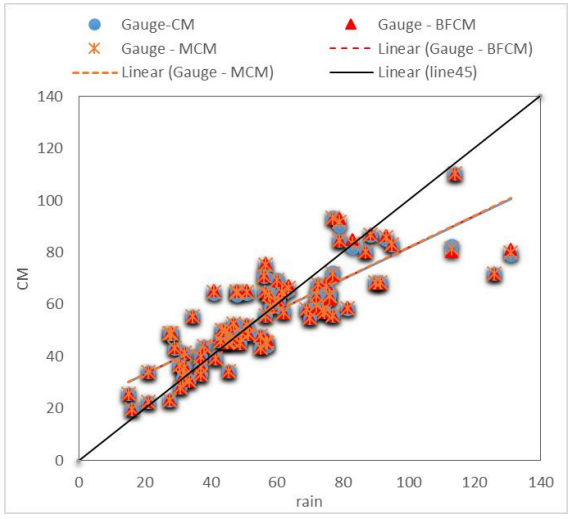
**جدول۳- نتایج تجزیه و تحلیل آماری از مقایسه روش‌های مورد استفاده با داده‌های مشاهداتی**

**Table 3- Statistical analysis results of comparing the methods used with observed data.**

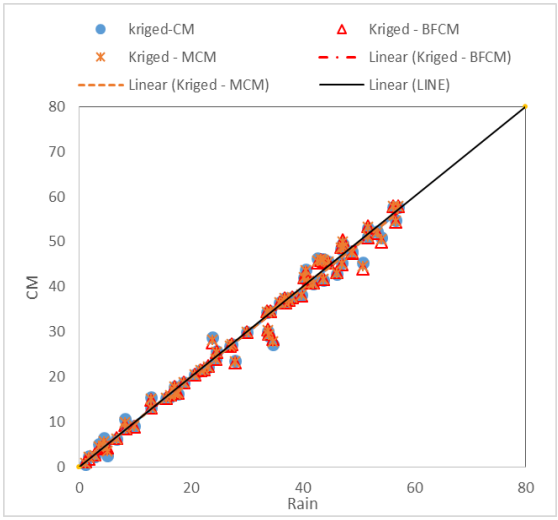
| Rain Event | Method | MAE | MBE | RMSE | Bais | PBais | SD | R^2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11/23/2014-11/26/2014 | CM | 15.11 | -4.18 | 18.58 | -0.07 | -7.03 | 18.10 | 0.98 |
| | BFCM | 15.18 | -4.07 | 18.68 | -0.07 | -6.84 | 18.22 | 0.97 |
| | MCM | 15.13 | -4.12 | 18.62 | -0.07 | -6.93 | 18.16 | 0.98 |
| 03/17/2015-03/18/2015 | CM | 15.96 | -11.31 | 19.99 | -0.35 | -35.21 | 16.39 | 0.98 |
| | BFCM | 15.93 | -11.40 | 20.02 | -0.35 | -35.48 | 16.37 | 0.98 |
| | MCM | 15.94 | -11.35 | 20.00 | -0.35 | -35.34 | 16.38 | 0.98 |
| 06/22/2015-06/24/2015 | CM | 23.40 | -20.50 | 25.48 | -0.91 | -91.12 | 15.25 | 0.98 |
| | BFCM | 23.39 | -20.43 | 25.41 | -0.91 | -90.81 | 15.22 | 0.98 |
| | MCM | 23.40 | -20.46 | 25.44 | -0.91 | -90.96 | 15.23 | 0.98 |
| 10/11/2015-10/12/2015 | CM | 19.24 | 4.31 | 25.22 | 0.09 | 8.90 | 25.02 | 0.99 |
| | BFCM | 19.28 | 4.30 | 25.19 | 0.09 | 8.88 | 24.98 | 0.98 |
| | MCM | 19.24 | 4.30 | 25.20 | 0.09 | 8.88 | 25.00 | 0.99 |
| 12/31/2015-01/03/2016 | CM | 28.67 | 28.08 | 36.59 | 0.64 | 63.67 | 23.62 | 0.99 |
| | BFCM | 28.68 | 28.14 | 37.29 | 0.64 | 63.82 | 24.63 | 0.96 |
| | MCM | 28.67 | 28.11 | 36.91 | 0.64 | 63.75 | 24.08 | 0.98 |

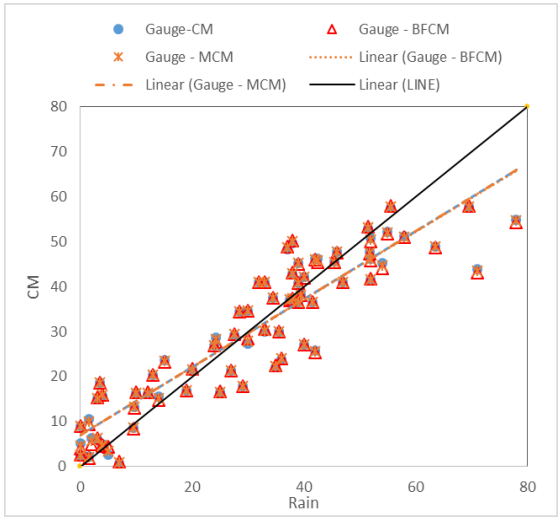
درفرآیند اعتبارسنجی روش‌های مورد استفاده به‌منظور ترکیب و اصلاح بارش در سطح حوضه به کمک ایستگاه‌های باران سنجی و مقادیر بارش ماهواره‌ای، با مقایسه مقادیر تصاویر و نقشه‌های به‌دست آمده از روش‌های مبنتی بر ترکیب وضعیت با مقادیر مشاهداتی از ایستگاه‌های زمینی با استفاده از معیار و آنالیزهای آماری صورت گرفت که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. هم چنین در شکل (۸) نمودار پراکندگی و میزان همبستگی مقادیر داده بارش ادغام شده با مقادیر ایستگاه‌های زمینی و مقادیر درون‌یابی شده ایستگاه‌ها با روش کریجینگ برای تدام‌های بارندگی مختلف در سطح حوضه نشان داده شده است. باتوجه به جدول (۳) و نمودار همبستگی ترسیم شده نتایج نشان می‌دهد که بین مقادیر هرسه روش ترکیب وضعیت با داده‌های زمینی همبستگی معنی داری وجود دارد.



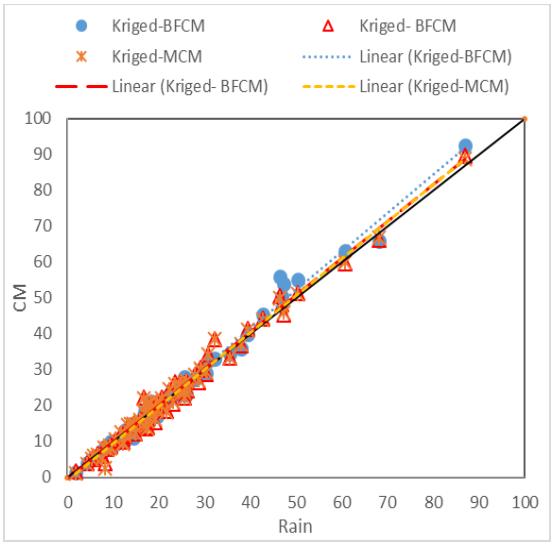



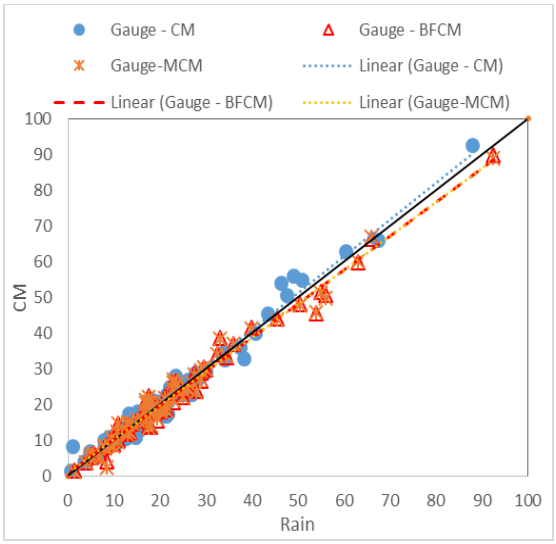

**Rainfall events (11/23/2014-11/26/2014)**



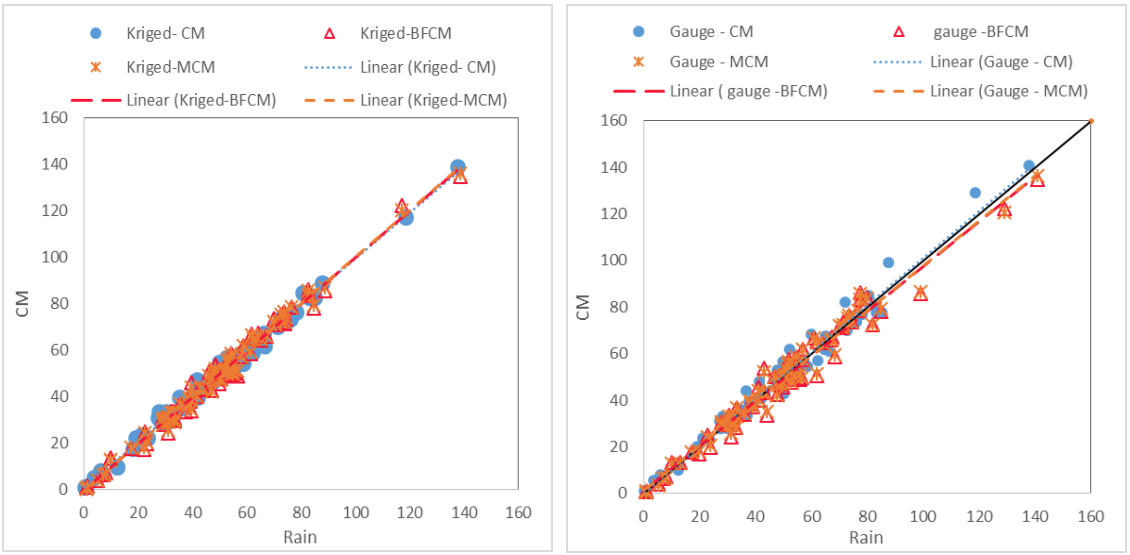

**Rainfall events (03/17/2015-03/18/2015)**



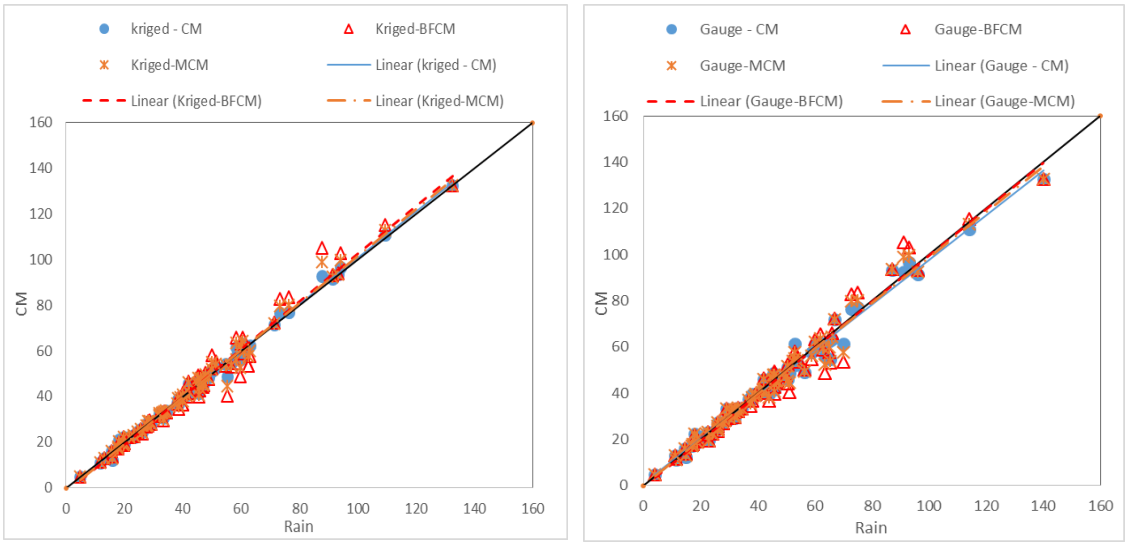




**Rainfall events (06/22/2015-06/24/2015)**

*DOI:* 10.22055/jise.2020.30239.1863




**Rainfall events (10/11/2015-10/12/2015)**




**Rainfall events (12/31/2015-01/03/2016)**

**Fig. 8- Scatter plots and correlation coefficient of the comparison between estimate values of conditional merging methods and rain gauge observation data.**

**شکل ۸- نمودار پراکندگی و میزان همبستگی بین داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی و درون‌یابی شده با روش kriging با مقادیر بارش حاصل از روش‌های ترکیب**

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) و با مقایسه آنالیزهای آماری صورت گرفته بر نتایج هریک از روش های CM، BFCM و MCMبا داده‌های مشاهداتی، نشان می‌دهد که هر سه روش مورد استفاده به‌منظور ترکیب و اصلاح بارش در سطح حوضه مورد مطالعه دارای نتایج نزدیک به هم و قابل‌قبولی بوده است، اما به‌منظور انتخاب و پیشنهاد روش مناسب در ترکیب و اصلاح بارش با هر دو ویژگی توزیع مکانی و حفظ مقادیر بارش، می‌توان گفت که روش ترکیب وضعیت (CM) دارای نتایج بهتر و مورد قبول‌تری می‌باشد و به‌عنوان روش مناسب تعیین شد.

هم چنین با مقایسه مقادیر مشخصات آماری و متوسط بارش منطقه‌ای هریک از روش‌های ترکیب به کاربرد شده در تصحیح و ترکیب بارش ماهواره‌ای و زمینی در جدول (۴) به طور کلی روش ترکیب وضعیت نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. هم چنین براساس جداول فوق ذکر و نتایج مطالعه‌های قبلی انجام شده (Sinclair and pegram, 2005) روند داده‌های بارش ماهواره‌ای دارای مقادیر کم برآورد و داده‌های درون‌یابی شده و ترکیب شده دارای یک روند صعودی و بیش برآوردی هستند.

**جدول٤- مشخصات آماری روش‌های ترکیب بارش زمینی و ماهواره‌ای در سطح حوضه آبریز**

**Table 4- Statistical Characteristics of the satellite–rain gauge data merging technique in the basin.**

| Rain event | Method | Max | Mean | Min | SD | CV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 11/23/2014-11/26/2014 | CM | 93.57 | 51.81 | 10.07 | 18.62 | 0.36 |
| | BFCM | 93.07 | 52.05 | 10.43 | 18.71 | 0.36 |
| | MCM | 93.32 | 51.93 | 10.25 | 18.66 | 0.36 |
| 03/17/2015-03/18/2015 | CM | 69.01 | 38.29 | 7.06 | 13.28 | 0.34 |
| | BFCM | 71.74 | 38.51 | 8.60 | 13.49 | 0.35 |
| | MCM | 70.38 | 38.4 | 7.83 | 13.37 | 0.34 |
| 06/22/2015-06/24/2015 | CM | 89.7 | 19.4 | 1.54 | 10.98 | 0.55 |
| | BFCM | 87.91 | 19.55 | 0.63 | 10.83 | 0.56 |
| | MCM | 88.81 | 19.48 | 1.12 | 10.88 | 0.56 |
| 10/11/2015-10/12/2015 | CM | 137.77 | 51.64 | -0.36 | 22.9 | 0.44 |
| | BFCM | 134.66 | 51.85 | 0.78 | 23.49 | 0.45 |
| | MCM | 136.23 | 51.75 | 0.22 | 23.16 | 0.44 |
| 12/31/2015-01/03/2016 | CM | 132.58 | 35.27 | 4.77 | 18.48 | 0.52 |
| | BFCM | 132.57 | 35.62 | 4.8 | 20.17 | 0.56 |
| | MCM | 132.63 | 35.62 | 4.8 | 20.17 | 0.57 |

## نتیجه گیری

هدف از این مطالعه اصلاح و بهبود عملکرد داده‌های بارش در سطح حوضه آبریز مند با استفاده از ترکیب داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای به کمک روش‌های زمین‌آماری و روش‌های ترکیب می‌باشد. به‌همین منظور از معیارهای آنالیز آماری برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از مقادیر بارش منطقه‌ای (توزیع شده در سطح) به‌وسیله روش‌های مختلف شامل روش ترکیب وضعیت (CM)، روش ترکیب وضعیت مرتبط با اریبی (BFCM) و روش ترکیب وضعیت متوسط (MCM) با مقادیر بارش مشاهداتی شبکه ایستگاه‌های زمینی در سطح حوضه آبریز استفاده شد. براساس تجزیه و تحلیل‌های آماری صورت گرفته هر سه روش CM، BFCM و MCM به‌طور متوسط به‌ترتیب با میزان RMSE ۲۵/۱۷، ۲۵/۳۲ و ۲۵/۲۳ دقت قابل قبولی دارند. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر بارش منطقه‌ای برآوردی از روش ترکیب وضعیت (CM) نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد به‌طوری که مقادیر بارش ترکیب شده مقادیر بارش ایستگاه زمینی را حفظ کرده و توزیع مکانی بارش را در سطح حوضه نسبت به بارش ماهواره‌ای بهبود بخشیده است. به‌طور کلی این مطالعه اعتبار روش ترکیب وضعیت را برای تخمین و ترکیب داده‌های بارش زمینی و ماهواره‌ای به‌منظور اصلاح بارش منطقه‌ای در سطح حوضه آبریز مند را نشان می‌دهد.

## تقدیر و تشکر

از کارشناسان محترم شرکت آب منطقه‌ای فارس و بوشهر به‌دلیل همکاری فراوان در تهیه اطلاعات مورد نیاز تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پایان‌نامه با کد GN: SCU.WH95.589 صورت گرفته است.

## References

1- Acquaotta, F., Fratianni, S., and Venema, V., 2016. Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. International *Journal of Climatology* 36,pp. 3963-3974. DOI: 10.1002/joc.4606.

2- AghaKouchak, A., Mehran, A., Norouzi, H. and Behrangi, A., 2012. Systematic and random error components in satellite precipitation data sets. *Geophysical Research Letters*, *39*(9).pp. 1-4. DOI: 10.1029/2012GL051592.

3- Barrett, E. C., 1970. The estimation of monthly rainfall from satellite data. *Monthly weather review* 98,pp 322-327. DOI: 10.1175/1520-0493(1970)098<0322:TEOMRF>2.3.CO;2.

4- Borup, M., Grum, M., Linde, J.J. and Mikkelsen, P.S., 2016. Dynamic gauge adjustment of high-resolution X-band radar data for convective rain storms: Model-based evaluation against measured combined sewer overflow. *Journal of Hydrology*, *539*, pp.687-699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.002.

5- Cremonini, R., Tiranti, D. and Barbero, S., 2015. The urban flooding early warning system of the greater Turin (North-Western Italy) based on weather-radar observations. In *Engineering Geology for Society*

*and Territory-Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* (pp. 837-842). Springer International Publishing.

6- Doviak, R.J., Zrnic, D.S. and Schotland, R.M., 1994. Doppler radar and weather observations. *Applied Optics*, *33*(21), p.4531.

7- Ehret, U., 2002. Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. *University of Stuttgart, Germany*.

8- Fang, J., Yang, W., Luan, Y., Du, J., Lin, A. and Zhao, L., 2019. Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric research*, *223*, pp.24-38.

9- Goormans, T. and Willems, P., 2013. Using local weather radar data for sewer system modeling: case study in Flanders, Belgium. *Journal of Hydrologic Engineering*, *18*(2), pp.269-278. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000589.

10- Goudenhoofdt, E. and Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(2), pp.195-203.

11- Guenzi, D., Fratianni, S., Boraso, R. and Cremonini, R., 2017. CondMerg: an open source implementation in R language of conditional merging for weather radars and rain gauges observations. *Earth Science Informatics*, *10*, pp.127-135.

12- Huff, F.A., 1970. Sampling errors in measurement of mean precipitation. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, pp.35-44.

13- Isaaks, E., Srivastava, R., 1989. Applied geostatistics. Oxford University Press.

14- Jordan, P., Seed, A. and Austin, G., 2000. Sampling errors in radar estimates of rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *105*(D2), pp.2247-2257. DOI: 10.1029/1999JD900130.

15- Journel, A. G., and Huijbregts, C. J., 1978. "Mining geostatistics," Academic press London.

16- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *52*(6), pp.119-139.

17- Kim, B.S., Hong, J.B., Kim, H.S. and Yoon, S.Y., 2007. Combining radar and rain gauge rainfall estimates for flood forecasting using conditional merging method. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat* (pp. 1-16). DOI: 10.1061/40927(243)414.

18- Hsu, K.L., Gupta, H.V. and Sorooshian, S., 1997. Application of a recurrent neural network to rainfall-runoff modeling. In *The 1997 24 th Annual Water Resources Planning and Management Conference, Houston, TX, USA, 04/06-09/97* (pp. 68-73).

19- Madani, H., (1995). Fundamentals of Statistics, Amir Kabir University of Technology, Tafresh Branch, 659 p (in Persian).

20- Mahmoud, M.T., Hamouda, M.A. and Mohamed, M.M., 2019. Spatiotemporal evaluation of the GPM satellite precipitation products over the United Arab Emirates. *Atmospheric Research*, *219*, pp.200-212. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.12.029.

21- Marshall, J.S. and Palmer, W.M.K., 1948. The distribution of raindrops with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, *5*(4), pp.165-166. DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2.

22- Oliver, M.A. and Webster, R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, *4*(3), pp.313-332. DOI: 10.1080/02693799008941549.

23- Pannatier, Y., 2012. *VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D*. Springer Science & Business Media.

24- Pignone, F., Rebora, N. and Silvestro, F., 2015, April. Modified Conditional Merging technique: a new method to estimate a rainfall field combining remote sensed data and raingauge observations. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 3013).

25- Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M. and Fitzner, D., 2013. Rainfall estimation using moving cars as rain gauges–laboratory experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, *17*(11), pp.4701-4712..

26- Scofield, R.A., 1987. The NESDIS operational convective precipitation-estimation technique. *Monthly Weather Review*, *115*(8), pp.1773-1793. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1773:TNOCPE>2.0.CO;2.

27- Sinclair, S. and Pegram, G., 2005. Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, *6*(1), pp.19-22.DOI: 10.1002/asl.85.

28- Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H.V., Imam, B. and Braithwaite, D., 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *81*(9), pp.2035-2046. DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2035:EOPSSE>2.3.CO;2.

29- Vignal, B. and Krajewski, W.F., 2001. Large-sample evaluation of two methods to correct range-dependent error for WSR-88D rainfall estimates. *Journal of Hydrometeorology*, *2*(5), pp.490-504. DOI: 10.1175/1525-7541(2001)002<0490:LSEOTM>2.0.CO;2.

30- Zandonadi, L., Acquaotta, F., Fratianni, S. and Zavattini, J.A., 2016. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River basin). *Theoretical and applied climatology*, *123*, pp.741-756.

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 21-37**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Investigation of Temporal and Spatial Changes in the Occurrence of Frost in Isfahan Province Using the Models of the Sixth Climate Change Report

E. Mazaheri[1], J. Abedi Koupai[2*], M. Heidarpor[3], M. J. Zareian[4] and S.A. Gohari[5]

*1- PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, College of Agricultural , Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.*
*2* - Corresponding Author, Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, (koupai@cc.iut.ac.ir).*
*3- Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.*
*4 - Assistant Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran.*
*5 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 11 January 2022
Revised: 14 July 2022
Accepted: 16 July 2022

*Keywords:*
Emission Scenarios, General Circulation Models, LARS-WG, Minimum Temperature.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Mazaheri, E., Abedi Koupai, J., Heidarpour, M., Zareian, M. J., Gohari, S. A. (2025). 'Investigation of Temporal and Spatial Changes in the Occurrence of Frost in Isfahan Province Using the Models of the Sixth Climate Change Report', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 21-37. doi: 10.22055/jise.2022.39312.2005.

## Introduction

Extreme climate events and agricultural disasters have increased in the past decades (IPCC, 2012). Frost disaster is one of the extreme events characterized by a short duration of freezing air that is destructive to crop growth and production (Xiao et al., 2018). Every year, early fall and late spring frost, due to the coincidence with the critical stages of plant life, reduces agricultural product yield. Investigation of changes in frost parameters such as the date of the first fall frost (FFF), the date of the last spring frost (LSF), growing season length (GSL), the number of frost days (FD), and the length of the frost period (LF) during the future period, to provide proper planning for planting crops and take the necessary measures to prevent the occurrence of frost with sensitive stages of plant growth is essential(Esmaeili et al., 2011). This study aims to investigate the temporal and spatial changes of the mentioned frost parameters of the future period (2051-2022) based on three emission scenarios, SSP126, SSP245, and SSP585, compared to the future statistical period in Isfahan province.

## Methodology

In this study, Isfahan province is considered a study area. The minimum temperature data of the past period and the outputs of 10 *general circulation models were downscaled by LARS-WG* for the future period (2051-2022). In addition, the three emission scenarios SSP126, SSP245, and SSP585 of 13 stations in Isfahan province were used. General circulation models are weighted based on the average deviation of the minimum temperature simulated in the base period from the average of the observed data. Finally, for all stations, by combining the weight obtained for each model and the difference of the data of each scenario from its base value, the micro-scaled output data for each station was obtained using the LARS-WG6 model. To extract the frost parameters, preparing the minimum temperature data of the observation and future periods was started by controlling the minimum

temperature from the first day of September and the first day when the minimum temperature is equal to the desired threshold; less than this threshold is considered the first fall frost (FFF) and the last day of frost (LSF). The dates are set as Julius days. Then the LF, GSL, and FD are calculated, and the spatial changes of the frost parameters in the future period based on all emission scenarios compared to the past period are plotted by the ARC GIS 10.8.

## Results and Discussion

### Temporal and spatial distribution of changes in the first fall frost and the last spring frost of the future period compared to the past period

On average, Chadegan (Oct 19) and Khour and Biabanak (Dec 6) had the earliest and the latest date of the first fall frost in the past statistical period. The average of the earliest date of the first fall frost at Chadegan station under the SSP585 emission scenario occurs one day later than the past statistical period, and in Khour and Biabank, the average of the latest date of the first fall frost under the emission scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 occur three, five and six days later than the past statistical period, respectively. Zoning the number of changes in the first fall frost in the future period under different emission scenarios compared to the past statistical period shows that the most increasing change in Khour and Biyabank under the SSP585 scenario occurs six days later, and the most decreasing change is related to Isfahan station under SSP126 scenario that it occurs eight days earlier.

For the last spring frost, Chadegan (Apr 21) and Ardestan (Feb 27) had the earliest and the latest date of the last spring frost in the past statistical period. The average of the latest date of the last spring frost at Chadegan station under the SSP126 emission scenario occurs one day later than the past statistical period. At Ardestan, under the emission scenarios of SSP126, SSP245, and SSP585, it happens five, four, and three days later than the past statistical period, respectively. Zoning shows that changes in the date of the last spring frost in the future statistical period compared to the past statistical period in all three scenarios in Khansar, Natanz, and Ardestan stations are increasing, which means the last spring frost occurs later, and the changes in the Semirom, Daran and Fereydun Shahr are decreasing that means the last spring frosts occur earlier.

### Temporal and spatial distribution of changes in the frost length period, number of frost days, and growing season length of the future period compared to the past period

The longest frost length period in the past statistical period was observed in Chadegan with 184 days and the shortest in Khour and Biyabank with 81 days. However, the expression of this period in terms of the number of days does not mean that frost occurs every day. In the future statistical period, under all emission scenarios, the length of the frost length period at Chadegan, Khour, and Biabank will decrease. Moreover, some changes in the length of the frost period under all emission scenarios throughout the province are observed. Zoning shows that, in red areas, most changes in the length of the frost period occur decreasingly, and in blue areas, the most changes occur incrementally.

The highest number of frost days is related to Chadegan with 149 days, and the lowest is related to Khour and Biyabank with 25 days. In the future statistical period, the number of frost days at all stations will decrease under all emission scenarios. Zoning shows that Changes in the number of frost days in all selected provincial stations are decreasing.

The most extended growing season length is related to Khour and Biyabank with 146 days, and the lowest is related to Chadegan with 91 days. In the future statistical period, under all emission scenarios, the longest growing season length is associated with Khour and Biabank, and the shortest is related to Chadegan, but the changes in the growing season length are increasing in all stations. Zoning shows that the most changes in the growing season length are related to Chadegan, which increases under the emission scenarios of SSP126, SSP245, and SSP585 for 17, 18, and 21 days, respectively.

**The effect of frost changes on the yield of agricultural products in the future**

Spring does not start at the same time in different stations of the province, and the growth of some early flowering trees, such as almonds and apricots, starts earlier than the spring season, so it is essential to pay attention to the growth stages of plants that coincide with these frosts. Suppose the date of occurrence of the last spring frost in different stations in the future statistical period under all 3 diffusion scenarios coincides with the critical stages of plant growth (flowering stage). In that case, there is a possibility that spring frosts and agricultural yields will be reduced. Due to changes in the date of the first fall frost and the last spring frost, the length of the growing season varies at different stations; therefore, choosing the proper planting time and cultivars resistant to cold and frost is essential in the production efficiency of agricultural products.

## Conclusion

Every year, early fall and late spring frost, due to the coincidence with the critical stages of plant life, reduces agricultural product yield. In the past statistical period, the average date of occurrence of the first fall frost is related to Chadegan, Daran, Fereydunshahr, and Shahreza, and the average of the last spring frost in Khour and Biabank, and Ardestan occur earlier than other stations. In the future statistical period, the date of occurrence of the first fall frost and the last spring frost under all emission scenarios are the same as in the past statistical period. In addition, increasing and decreasing changes were observed in the date of the first fall frost and the last spring frost in the future statistical period compared to the past. The average of the earliest date of the first fall frost at Chadegan station under the SSP585 emission scenario occurs one day later than the past statistical period, and in Khour and Biabank, the average of the latest date of the first fall frost under the emission scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 occur three, five and six days later than the past statistical period, respectively. The average of the latest date of the last spring frost at Chadegan station under the SSP126 emission scenario occurs one day later than the past statistical period. Moreover, in Ardestan, under the emission scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 occur five, four, and three days later than in the past statistical period, respectively. By knowing the date of the last spring frost, it is possible to determine the planting date of many crops, and planting time should be chosen so that the critical stages of plant growth are not exposed to spring frost. Also, changes in frost length period, number of frost days, and growing season length were observed in the future statistical period compared to the past statistical period throughout the Isfahan province. The most prolonged frost length period in the past statistical period was observed in Chadegan with 184 days and the shortest in Khour and Biyabank with 81 days. The highest number of frost days is related to Chadegan with 149 days, and the lowest is related to Khour and Biyabank with 25 days. In the future statistical period, the number of frost days at all stations will decrease under all emission scenarios. The longest growing season is related to Khour and Biyabank with 146 days, and the lowest is related to Chadegan with 91 days. In the future statistical period, under all emission scenarios, the longest growing season length is associated with Khour and Biabank, and the shortest is related to Chadegan, but the changes in the growing season length are increasing in all stations. The most changes in the growing season length are related to Chadegan, which increases under the emission scenarios of SSP126, SSP245, and SSP585 for 17, 18, and 21 days, respectively.

## Acknowledgment

The author gratefully thanks the Isfahan University of Technology and the Iran Meteorological Organization for providing the necessary facilities and data for this study.

## References

1- Esmaeili, R., Gandomkar, A. and Ghayoor, H. A., 2011. Zoning of climate changes rate base on agriculture approach in future climatic period (case study Khorasan Razavi province). *Journal of Geography and Environmental Planning*, *41*(1), pp. 35-52. (In Persian).

2- IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *Cambridge University Press, Cambridge*, UK.

3- Xiao, L., Liu, L., Asseng, S., Xia, Y., Tang, L., Liu, B., Cao, W. and Zhu, Y., 2018. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *260*, pp. 154-164.

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۳۷-۲۱

# بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع یخبندان‌ها در استان اصفهان با استفاده از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم

الهام مظاهری[۱]، جهانگیر عابدی کوپایی[۲*]، منوچهر حیدرپور[۳]، محمد جواد زارعیان[۴] و سید علیرضا گوهری[۵]

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، koupai@cc.iut.ac.ir.

۳ - استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۴ - استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

۵ - دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

## چکیده

**همه ساله وقوع یخبندان زودرس پاییزه و دیررس بهاره به‌دلیل هم‌زمانی با مراحل حساس زندگی گیاه باعث کاهش بازده محصولات کشاورزی می‌شود. در این تحقیق از داده‌های دمای کمینه دوره گذشته و داده‌های ریز مقیاس شده خروجی مدل‌های گردش عمومی جو توسط نرم‌افزار LARS-WG6 برای دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سه سناریو انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 استان اصفهان استفاده گردید. نتایج نشان داد میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه در ایستگاه‌های اردستان، خور و بیابانک و نطنز در دوره آینده تحت سه سناریو انتشار نسبت به دوره گذشته یک تا شش روز دیرتر اتفاق می‌افتد و میانگین تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره در ایستگاه اردستان در دوره آینده تحت سه سناریو انتشار نسبت به دوره گذشته به‌ترتیب پنج، چهار و سه روز دیرتر رخ می‌دهد. با توجه به تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره، بیشترین تغییرات طول دوره رشد مربوط به ایستگاه چادگان است که تحت سناریو SSP585، ۲۱ روز نسبت به دوره گذشته افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات کاهشی طول دوره یخبندان در ایستگاه خور و بیابانک تحت سناریو SSP585 اتفاق می‌افتد و بیشترین تغییرات کاهشی تعداد روزهای یخبندان در ایستگاه چادگان تحت سناریو انتشار SSP585، ۲۶روز می‌باشد.**

**کلیدواژه‌ها:** دمای کمینه، سناریوهای انتشار، مدل‌های گردش عمومی جو، LARS-WG.

## مقدمه

حوادث آب و هوایی شدید و بلایای کشاورزی در دهه‌های گذشته افزایش یافته است. یخبندان یکی از وقایع شدید است که با مدت زمان کوتاه یخبندان هوا مشخص می‌شود و برای رشد و تولید محصول مخرب است (Xiao et al., 2018). بررسی تغییرات پارامترهای یخبندان از جمله تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه، آخرین یخبندان بهاره، طول دوره رشد، تعداد روزهای یخبندان و طول دوره یخبندان طی دوره آینده به‌منظور ارائه برنامه‌ریزی صحیح برای کاشت محصولات و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای جلوگیری از وقوع یخبندان با مراحل حساس رشد گیاه مورد توجه می‌باشد. امروزه دست‌یابی به این مهم با بسط و توسعه مدل‌های اقلیمی فراهم شده است. معتبرترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (General circulation models) می‌باشد (Esmaeili et al., 2011). در مورد یخبندان، پژوهش‌های مختلفی در جهان و ایران صورت گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر شماره روز اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره در ایران تحت دو سناریو انتشار $A_2$ و $B_2$ برای چشم‌انداز (۲۰۲۰-۲۰۳۹) نشان داد که میانگین شماره روز آخرین یخبندان بهاره در ایستگاه‌های کرمانشاه، گرگان و رشت کاهش و در ایستگاه‌های اصفهان و زاهدان بدون تفاوت و در سایر ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. میانگین شماره روز اولین یخبندان پاییزه در ایستگاه کرمانشاه افزایش، در ایستگاه رشت بدون تفاوت و در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهش خواهد یافت (Behyar et al., 2013). در بررسی چشم‌انداز زمان وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره با استفاده از مدل HadCM3 تحت دو سناریوی $A_2$ و $B_2$ در غرب ایران مشخص شد که تاریخ یخبندان

*DOI:* 10.22055/jise.2022.39312.2005

پاییزه دیرتر و تاریخ یخبندان بهاره زودتر از گذشته روی می‌دهد (Agha Shariatmadari et al., 2016). Abedi-Koupai et al. (2021) بیان کردند که برای شش ایستگاه انتخابی استان اصفهان در دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ میانگین شماره روز اولین یخبندان پاییزه براساس سناریوهای انتشار $A_2$، $B_1$ و $A_1B$ افزایش خواهد یافت و میانگین شماره روز آخرین یخبندان بهاره در تمامی ایستگاه‌ها و همه سناریوها کاهش خواهد یافت. Rezaei Banafsheh Dargh et al. (2019) بیان کردند براساس برونداد مدل HadCM3 تحت سناریوهای $A_2$ و $B_1$ در شمال شرق کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی یخبندان‌های زودرس پاییزه یک الی دو هفته دیرتر شروع می‌شوند و یخبندان‌های دیررس بهاره نیز بین نه تا ۱۸ روز زودتر به پایان می‌رسند. Imani pour et al. (2019) با مقایسه نتایج در دوره پایه و آینده براساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو برای ایستگاه همدید گرگان بیان کردند که تعداد روزهای یخبندان در دوره پایه ۷۵ روز و سناریوهای خوشبینانه، حد واسط و بدبینانه به‌ترتیب ۴۶، ۳۹ و ۳۱ است که کاهش تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نسبت به دوره پایه مشهود است. همچنین نتایج این مقایسه حاکی از کاهش طول دوره یخبندان و افزایش طول دوره رشد می‌باشد. Jafar begloo et al. (2018) بیان کردند برای ۲۱ ایستگاه در شمال غرب ایران با استفاده از مدل HadCM3 و تحت سناریوهای $A_2$ و $B_1$ طول دوره سرما و یخبندان در ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد که میزان کاهش در ایستگاه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در پژوهشی با بررسی تغییرات شاخص‌های یخبندان دوره‌ی (۱۹۸۰-۲۰۱۰) منطقه دریاچه‌های پنجگانه ایالات متحده، روند منفی آخرین یخبندان بهاره و مثبت اولین یخبندان پاییزه که منجر به افزایش طول دوره رشد می‌گردد مشاهده گردید (Yu et al., 2014). در پژوهشی توسط Qian et al. (2012) مشخص گردید زمان وقوع یخبندان‌های دیررس بهاره و زودرس پاییزه در کانادا در طول قرن بیستم به سمت فصل زمستان جابه‌جا شده‌اند. گزارش Zhang et al. (2014) نشان می‌دهد که تاریخ رخداد نخستین یخبندان پاییزه در فلات تبت در بازه زمانی (۱۹۶۰-۲۰۱۰) ۱/۵ روز در هر دهه به تعویق افتاده است و واپسین یخبندان بهاره ۱/۹ روز در هر دهه زودتر رخ می‌دهد. در پژوهشی توسط Seyyed Nezhad Golkhatmi et al. (2017) با بررسی روزهای یخبندان ایستگاه‌های همدید خراسان رضوی مشخص گردید اولین یخبندان در دوره بازگشت دو ساله در تمام ایستگاه‌ها زودتر از آبان رخ نمی‌دهد و همچنین در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله نیز هیچگاه زودتر از اول مهر رخ نمی‌دهد. در پژوهشی در لهستان مشخص شد که تاریخ رخداد یخبندان‌های دیررس بهاره، در اثر گرمایش جهانی در آینده، تغییر یافته و زمان وقوع آن‌ها جلوتر می‌افتد (Graczyk and Kundzewicz, 2016). در پژوهشی توسط Modala et al. (2017) با بررسی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو (GCM) برای دشت‌های منطقه تگزاس، مشخص گردید که تا سال ۲۰۷۰ روزهای یخبندان ۱۷/۹ تا ۳۰ درصد در کل منطقه کاهش می‌یابد. در پژوهش دیگری با پیش‌بینی تغییر اقلیم در اسپانیا، اثر یخبندان-های دیررس بهاره را بر روی فنولوژی گلدهی درختان بررسی کردند که نتایج حاصل، افزایش دمای کمینه در تمام ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه را نسبت به دوره پایه نشان داد (Hidalgo Galvez et al., 2018). در پژوهشی توسط Sobhani et al. (2017) با بررسی تاریخ آغاز و پایان یخبندان‌هادر استان اردبیل در دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰ مشخص گردید که در مناطق شمالی استان تاریخ خاتمه یخبندان دیررس در فروردین و در مرکز و جنوب مانند خلخال در ماه اردیبهشت پایان می‌یابد.

استان اصفهان به‌عنوان یکی از مناطق عمده تولید محصولات کشاورزی در سطح کشور، هر ساله خسارات زیادی بر اثر وقوع یخبندان متحمل شده است. بادام از مرحلهٔ تمام گل تا رسیدن میوه شش الی هشت ماه زمان نیاز دارد و رشد آن از اواخر اسفند شروع می‌شود و تا اواسط آبان ماه به طول می‌انجامد. با توجه به اینکه درخت بادام زمانی که میانگین دمای روزانه به بالای ۵ درجهٔ سانتی‌گراد برسد فعالیت خود را شروع می‌کند و بازشدن شکوفه به-طور طبیعی در اوایل فروردین ماه باید انجام پذیرد که این امر موجب می‌شود که محصول از سرماهای اوایل فروردین در امان بماند، اما اگر در طول زمستان هوا گرم باشد، موجب بازشدن زودتر از موعد شکوفه‌های بادام می‌شود و این شرایط موجب تأثیر سرماهای اوایل فروردین ماه در تولید بادام در شهرستان نجف آباد می‌شود (Nasr isfahani and Yazdan panah,2019).

در حوضه زاینده رود در فصل بهار یخبندان ضعیف، متوسط و شدید در حوضه زاینده رود رخ می‌دهد، به‌طوری که یخبندان ضعیف در تمامی ایستگاه‌ها و تا اواخر فروردین اتفاق می‌افتد، اما مناطق مرتفع شمال و شمال‌غرب حوضه در نیمه دوم اردیبهشت نیز یخبندان ضعیف را تجربه می‌کنند (Omidvar and Aslani, 2014). Abedi-Koupai et al. (2021) بیان کردند برای دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ میانگین شماره روز وقوع اولین یخبندان پاییزه تحت سناریوهای انتشار $A_2$، $B_1$ و $A_1B$ در مقایسه با اقلیم گذشته، در ایستگاه اصفهان دو تا پنج روز افزایش و برای میانگین شماره روز وقوع آخرین یخبندان بهاره، بین دو تا چهار روز کاهش مشاهده می‌شود. همچنین در این ایستگاه طول دوره یخبندان به‌طور میانگین برای ایستگاه اصفهان در مقایسه با اقلیم گذشته تحت سناریوهای انتشار ترتیب به میزان ۱۰، هفت و نه روز کاهش می‌یابد.

با دگرگونی و تحولات کوچک و بزرگ اقلیمی انتظار می‌رود یخبندان‌های دوره آینده نسبت به دوره گذشته دچار تغییراتی شوند. بررسی و شناخت دقیق این یخبندان‌ها در برنامه‌ریزی‌های محیطی به‌دلیل آسیب کمتر به محصولات کشاورزی ضروری است. از آنجایی که تمامی مطالعه‌های انجام شده در مورد تغییر اقلیم و یخبندان‌ها برای مدل‌های گزارش پنجم (Coupled model intercomparioson project 5) و قبل از آن انجام شده است،

با توجه به رفع برخی نواقص مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) در مدل‌های گزارش ششم (Coupled model intercomparioson project 6)، کاربرد مدل‌های این گزارش به منظور بررسی تغییرات یخبندان‌ها در دوره آینده نسبت به دوره گذشته ضروری می‌باشد که از جنبه‌های جدید بودن این مطالعه می‌باشد. مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) با مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) به دلیل نسل جدید مدل‌های آب و هوایی و سال شروع جدید (۲۰۱۵ برای گزارش ششم (CMIP6) در مقابل ۲۰۰۶ برای گزارش پنجم (CMIP5)) برای سناریوهای آینده و همچنین مجموعه جدیدی از مشخصات برای سناریوهای غلظت، انتشار و استفاده از زمین متفاوت است (Almazroui et al., 2020).

بنابراین با توجه به اینکه تاکنون مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی، رتبه‌بندی و بررسی تغییرات یخبندان‌ها با استفاده از مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) انجام نگرفته است، هدف از انجام این مطالعه بررسی تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای یخبندان (اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره، طول دوره رشد، طول دوره یخبندان و تعداد روزهای یخبندان) دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۱) براساس مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سه سناریو انتشار Shared socio-economic pathway126، SSP245 و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در استان اصفهان می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق محدوده مطالعاتی استان اصفهان می‌باشد. در این تحقیق داده‌های مورد بررسی به دو دوره آماری گذشته (۲۰۱۷-۱۹۸۸) و داده‌های ریز مقیاس شده ۱۰ مدل از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) برای دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245و SSP585 برای گزارش ششم تغییر اقلیم تقسیم می‌شوند (Almazroui et al., 2020; Gu et al., 2014). داده های دوره آماری گذشته از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) برای گزارش ششم از سایت مربوطه (https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6) دریافت گردید. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک و مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو مورد استفاده در این تحقیق به‌ترتیب در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است. در گام نخست داده‌های ماهانه دمای کمینه مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) برای دوره پایه ایستگاه‌ها و دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) جمع‌آوری گردید. از آنجا که فایل‌های دانلود شده مدل‌ها با پسوند nc می‌باشند، به منظور استخراج پارامترهای هواشناسی دمای کمینه لازم است اطلاعات این فایل‌ها استخراج گردند. این کار با برنامه Arc GIS مقدور می‌باشد. به‌منظور تجزیه و تحلیل عدم قطعیت از روش وزن‌دهی میانگین مشاهداتی دمای کمینه برای وزن‌دهی به نقاط انجام استفاده گردید. در این روش مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) براساس مقدار انحراف میانگین دمای کمینه شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی می‌شوند. در نهایت برای تمامی ایستگاه‌ها از ترکیب وزن به‌دست آمده برای هر مدل و اختلاف داده‌های هر سناریو از مقدار پایه آن، داده‌های ریز مقیاس شده خروجی برای هر ایستگاه توسط مدل LARS-WG6 به‌دست آمد. با استفاده از رابطه (۱) تا (۴) محاسبات انجام شده است.

LARS-WG یک مدل تصادفی است که از توزیع نیمه تجربی برای تولید داده‌های آب و هوایی به‌وسیله روش‌های ریزمقیاس گردانی آماری استفاده می‌کند و توانایی زیادی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دارد.

$$TE_m^{G_i} = \left| \left(\overline{T}_m^B\right)_{Gi} - \left(\overline{T}_m^B\right)_O \right| \quad (۱)$$

$$WT_m^{G_i} = \frac{1}{\frac{TE_m^{Gi}}{\sum_{i=1}^{10}(TE_m^{Gi})}} \quad (۲)$$

$$\Delta T_{mS_j} = \left| (\overline{T}_m^B)_{GiSj} - (\overline{T}_m^F)_{GiSj} \right| \quad (۳)$$

$$SSP_{mS_j} = \frac{\Delta T_{mSj} \times WT_m^{G_iS_j}}{WT_m^{G_i}} \quad (۴)$$

در این روابط:

$TE_m^{G_i}$: خطای مطلق مدل‌های GCM پارامتر دما

$\overline{T}$: میانگین دما

اندیس G: مدل‌های GCM

اندیس B: داده‌های مدل‌های GCM دوره پایه

اندیس O: داده‌های دوره گذشته ایستگاه‌ها

اندیس i: شمارنده مدل‌های GCM

اندیس m: ماه سال

$WT_m^{G_i}$: وزن مدل‌ها

اندیس S: سناریوهای انتشار

اندیس j: شمارنده سناریوها

$\Delta T_{mS_j}$: اختلاف مقادیر دما بین دوره پایه و آینده مدل‌های GCM تحت سناریوهای مختلف

$SSP_{mS_j}$: سناریوهای تولید شده به منظور تولید داده‌های کمینه با LARS-WG

پس از آماده سازی داده‌های دمای کمینه دوره گذشته و آینده، برای استخراج پارامترهای یخبندان به این صورت عمل می‌کنیم که از روز اول شهریور ماه شروع به کنترل دمای کمینه می‌کنیم و اولین روزی که دمای کمینه معادل آستانه مورد نظر باشد به‌عنوان اولین یخبندان در نظر گرفته می‌شود و برای آخرین روز یخبندان نیز به‌همین ترتیب عمل می‌کنیم و سپس تاریخ‌ها به صورت ژولیوسی تنظیم می‌گردند. در این مطالعه بر اساس توصیه سازمان هواشناسی جهانی WMO (2011) دماهای صفر درجه و پایین‌تر مبنای محاسبات قرار گرفت

*DOI:* 10.22055/jise.2022.39312.2005

(Rezaei Banafsheh Dargh et al., 2019). طول دوره یخبندان فاصله زمانی بین اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان بهاره می‌باشد. طول فصل رشد ، فاصله بین اولین دوره بعد از دهم تیرماه که حداقل شش روز متوالی دمای میانگین روزانه هوا بیشتر از پنج درجه سلسیوس باشد تا اولین دوره شش روز با دمای میانگین روزانه کمتر از پنج درجه سلسیوس است و آن را بر حسب روز نشان می‌دهند. تعداد روزهای یخبندان نیز به‌صورت روزهای یخبندان با دمای صفر درجه سانتی‌گراد و کمتر از آن تعریف می‌شود (Esmaeili et al., 2011). محاسبات مربوط به تعیین پارامتر-های یخبندان در نرم افزار اکسل انجام شده است. نقشه‌های پهنه-بندی تغییرات پارامترهای یخبندان (اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره، طول دوره رشد، طول دوره یخبندان و تعداد روزهای یخبندان) با روش وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse distance weighting) در محیط نرم‌افزار ARC GIS 10.8 ترسیم شده‌اند. مراحل انجام تحقیق به صورت خلاصه در شکل (۱) ارائه شده است.

**جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی**

**Table 1- Details of meteorological stations**

| Row | Name of station | Longitude | Latitude | Elevation(m) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Khour va Biabanak | 55°02′ | 33°47′ | 845 |
| 2 | Naein | 53°05′ | 32°51′ | 1549 |
| 3 | Isfahan | 51°41′ | 33°01′ | 1550.4 |
| 4 | Ardestan | 52°23′ | 33°23′ | 1252.4 |
| 5 | Natanz | 51°54′ | 33°32′ | 1684.9 |
| 6 | Kashan | 51°27′ | 31°58′ | 982.3 |
| 7 | Najafabad | 51°22′ | 32°38′ | 1641 |
| 8 | Shahreza | 51°50′ | 31°59′ | 1845.2 |
| 9 | Semirom | 51°42′ | 31°09′ | 2274 |
| 10 | Chadegan | 50°38′ | 32°46′ | 2100 |
| 11 | Daran | 50°22′ | 32°38′ | 2290 |
| 12 | Fereydun Shahr | 50°06′ | 32°56′ | 2490 |
| 13 | Khansar | 50°19′ | 33°14′ | 2300 |

**جدول۲- مدل‌های گردش عمومی جو گزارش ششم تغییر اقلیم**

**Table 2- List of CMIP6 models used in this study**

| Row | Model | Country | Horizontal Resolution (in degrees) |
|---|---|---|---|
| 1 | BCC-CSM2-MR | China | 1.12° × .12° |
| 2 | CESM2 | USA | 1.25° × 0.94° |
| 3 | CNRM-CM6-1 | France | 1.4° × 1.4° |
| 4 | CanESM5 | Canada | 2.81° × 2.78° |
| 5 | MIROC6 | Japan | 1.4° × 1.4° |
| 6 | MRI-EMS2-0 | Japan | 1.12° × 1.12° |
| 7 | IPSL-CM6A-LR | France | 2.5° × 1.26° |
| 8 | GISS-E2-1-G | USA | 2.5° × 2° |
| 9 | HadGEM3-GC31-LL | UK | 1.88° × 1.25° |
| 10 | NESM3 | China | 1° × 1.3° |

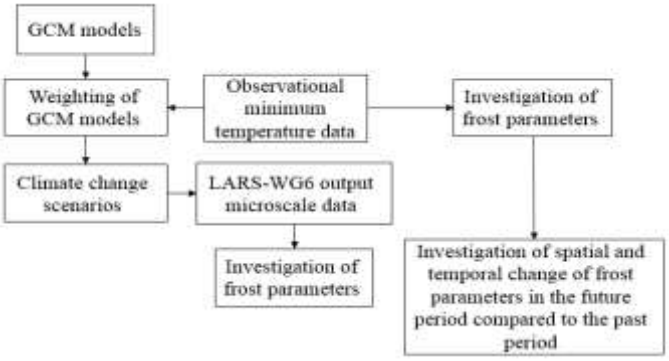



**Fig. 1- Flowchart of study**

**شکل۱- فلوچارت انجام تحقیق**

## نتایج و بحث

### توزیع زمانی و مکانی تغییرات اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره دوره آینده نسبت به دوره گذشته

نتایج حاصل از تغییرات زمانی اولین یخبندان زودرس پاییزه در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. باتوجه به جدول (۳) به‌طور میانگین ایستگاه چادگان زودترین (۲۸ مهر) و ایستگاه خور و بیابانک (۱۶ آذر) دیرترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه را در دوره آماری گذشته داشته‌اند. میانگین زودترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه در ایستگاه چادگان تحت سناریو انتشار SSP585، یک روز دیرتر (۲۹ مهر) نسبت به دوره آماری گذشته رخ می‌دهد و در ایستگاه خور و بیابانک میانگین دیرترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب سه، پنج و شش روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهند. اولین یخبندان زودرس پاییزه کم و بیش از وضعیت توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند،

به‌طوری که یخبندان در نواحی غربی استان زودتر آغاز می‌شود و نواحی شرقی استان دیرتر از سایر مناطق اولین یخبندان زودرس پاییزه را تجربه می‌کنند.

پهنه‌بندی میزان تغییرات اولین یخبندان زودرس پاییزه در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) تغییرات در ایستگاه‌های مختلف و تحت سناریوهای مختلف متفاوت است به‌طوری که در هر سناریو، بیشترین تغییرات افزایشی در مناطق آبی رنگ و بیشترین تغییرات کاهشی در مناطق قرمز رنگ رخ داده است. بیشترین تغییر افزایشی در ایستگاه خور و بیابانک تحت سناریو SSP585 یعنی شش روز دیرتر اتفاق می‌افتد و بیشترین تغییر کاهشی مربوط به ایستگاه اصفهان تحت سناریو SSP126 می‌باشد یعنی هشت روز زودتر اتفاق می‌افتد.

تغییرات زمانی آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به جدول (۴)، میانگین تاریخ آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری گذشته در ایستگاه اردستان (نهم اسفند) زودتر از بقیه ایستگاه‌ها و دیرترین آن در چادگان (دوم اردیبهشت) رخ داده است. آخرین مناطقی که در آن‌ها یخبندان خاتمه می‌یابد ایستگاه‌های واقع در نواحی غربی استان می‌باشد که تا دو اردیبهشت ادامه می‌یابد و نواحی شرقی و بخشی از نواحی مرکزی استان نیز اولین مناطقی هستند که یخبندان در آن‌ها خاتمه می‌یابد. در دوره آینده (۲۰۵۱-۲۰۲۲) تحت سناریو انتشار SSP126، میانگین دیرترین تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره یک روز دیرتر نسبت به دوره آماری گذشته در چادگان رخ می‌دهد و در ایستگاه اردستان تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب پنج، چها و سه روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهد.

پهنه‌بندی میزان تغییرات آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به شکل (۳) تغییرات تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته در هر سه سناریو در ایستگاه‌های خوانسار، نطنز و اردستان افزایشی به این معنا که آخرین یخبندان دیررس بهاره دیرتر اتفاق می‌افتد و در ایستگاه‌های سمیرم، داران و فریدونشهر کاهشی، به این معنا که آخرین یخبندان دیررس بهاره زودتر اتفاق می‌افتد، می‌باشد.

**جدول۳- نتایج محاسبات میانگین اولین یخبندان زودرس پاییزه در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف**

**Table 3- Results of calculations of the average of the first fall frost (FFF) in the past and future period under different scenarios**

| Station/ Scenario | Isfahan | Ardestan | Kashan | Shahreza | Chadegan | Khour Biabanak | Fereydun Shahr | Daran | Semirom | Naein | Najafabad | Natanz | Khansar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Past | 19 Nov | 3 Dec | 1 Dec | 7 Nov | 19 Oct | 6 Dec | 7 Nov | 5 Nov | 16 Nov | 20 Nov | 20 Nov | 26 Nov | 10 Nov |
| SSP1-2.6 | 12 Nov | 6 Dec | 30 Nov | 2 Nov | 19 Oct | 9 Dec | 31 Oct | 3 Nov | 11 Nov | 14 Nov | 17 Nov | 29 Nov | 9 Nov |
| SSP2-4.5 | 14 Nov | 5Dec | 30 Nov | 2 Nov | 19 Oct | 11 Dec | 31 Oct | 3 Nov | 13 Nov | 15 Nov | 16 Nov | 29 Nov | 10 Nov |
| SSP5-8.5 | 15 Nov | 8 Dec | 2 Dec | 3 Nov | 20 Oct | 12 Dec | 2 Nov | 5 Nov | 14 Nov | 16 Nov | 18 Nov | 30 Nov | 10 Nov |

*DOI:* 10.22055/jise.2022.39312.2005

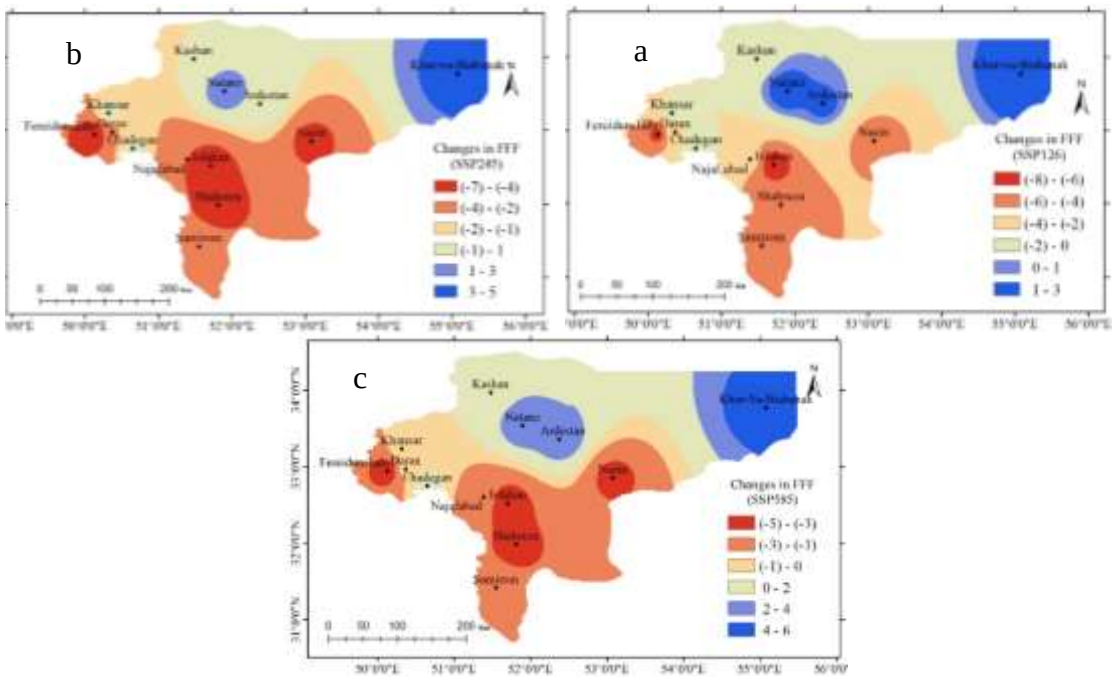



**Fig. 2- Zoning of changes in the first fall frost (FFF) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period**

**شکل۲- پهنه‌بندی میزان تغییرات اولین یخبندان زودرس پاییزه دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته**

**جدول٤- نتایج محاسبات میانگین آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف**

**Table 4- Results of calculations of the average of the last spring frost (LSF) in the past and future period under different scenarios**

| Station/ Scenario | Isfahan | Ardestan | Kashan | Shahreza | Chadegan | Khour Biabanak | Fereydun Shahr | Daran | Semirom | Naein | Najafabad | Natanz | Khansar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Past | 12 Mar | 27 Feb | 4 Mar | 26 Mar | 21 Apr | 25 Feb | 16 Apr | 11 Apr | 5 Apr | 15 Mar | 18 Mar | 17 Mar | 10 Apr |
| SSP1-2.6 | 15 Mar | 4 Mar | 4 Mar | 25 Mar | 22 Apr | 25 Feb | 14 Apr | 6 Apr | 31 Mar | 16 Mar | 17 Mar | 22 Mar | 16 Apr |
| SSP2-4.5 | 14 Mar | 3 Mar | 4 Mar | 24 Mar | 21 Apr | 23 Feb | 13 Apr | 5 Apr | 29 Mar | 14 Mar | 15 Mar | 20 Mar | 16 Apr |
| SSP5-8.5 | 13 Mar | 2 Mar | 2 Mar | 24 Mar | 21 Apr | 23 Feb | 13 Apr | 4 Apr | 29 Mar | 14 Mar | 15 Mar | 20 Mar | 15 Apr |

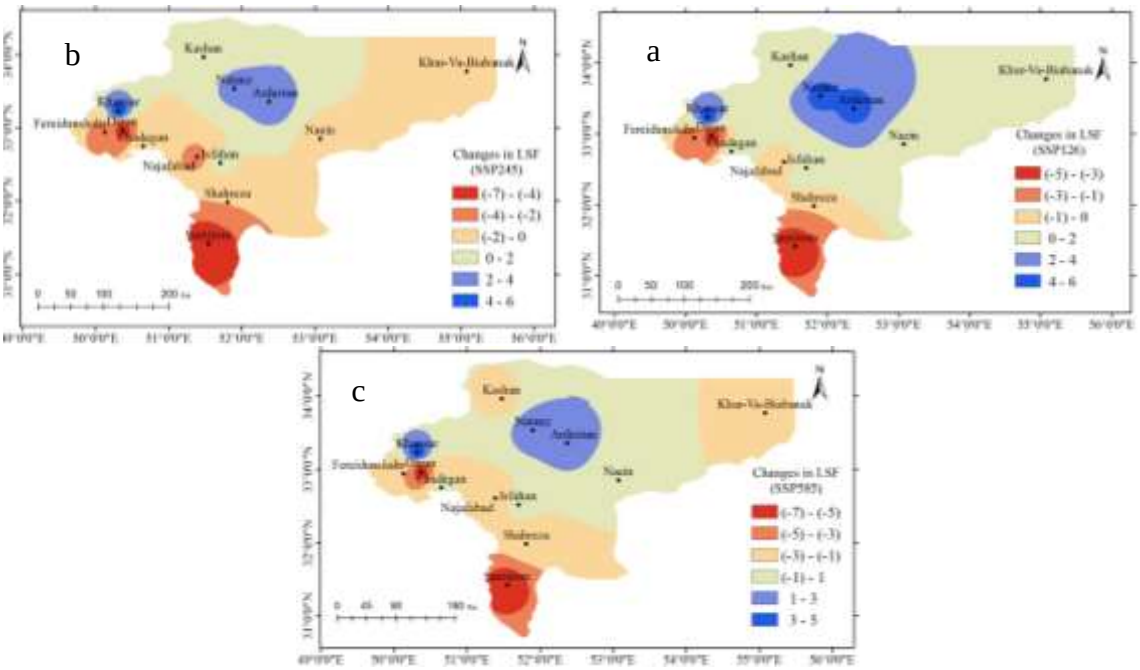



**Fig. 3- Zoning of changes in the last spring frost (LSF) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period**

**شکل۳- پهنه‌بندی میزان تغییرات آخرین یخبندان دیررس بهاره دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته**

نتایج مطالعه‌های گذشته نیز تأیید کننده جابه‌جایی زمان وقوع اولین یخبندان پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم است. Rezaei Banafsheh Dargh et al. (2019) بیان کردند در شمال شرق کشور تحت تأثیر تغییرات اقلیمی یخبندان‌های زودرس پاییزه یک الی دو هفته دیرتر شروع می‌شوند و یخبندان‌های دیررس بهاره نیز بین نه تا ۱۸ روز زودتر به پایان می‌رسند.

## توزیع زمانی و مکانی تغییرات طول دوره یخبندان، تعداد روزهای یخبندان و طول دوره رشد دوره آینده نسبت به دوره آماری گذشته

تغییرات زمانی طول دوره یخبندان در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۵) ارائه شده است. براساس جدول (۵) طولانی‌ترین دوره یخبندان در دوره آماری گذشته در چادگان با ۱۸۴ روز و کوتاه‌ترین آن در خور و بیابانک با ۸۱ روز مشاهده گردید، البته بیان این دوره بر حسب تعداد روز، به این معنی نیست که یخبندان هر روز اتفاق می افتد. در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار، طول دوره یخبندان در ایستگاه چادگان و خور و بیابانک کاهش می‌یابد. نوسانات طول دوره یخبندان در سراسر استان تحت هر سه سناریو تغییر اقلیم مشاهده می‌شود.

پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره یخبندان در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245و SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) در مناطق با رنگ قرمز بیشترین تغییرات طول دوره یخبندان، به صورت کاهشی رخ می‌دهد و در مناطق با رنگ آبی بیشترین تغییرات به صورت افزایشی می‌باشد. همچنین تحت هر سه سناریو ایستگاه خور و بیابانک بیشترین تغییرات کاهشی طول دوره یخبندان و ایستگاه اصفهان بیشترین تغییرات افزایشی طول دوره یخبندان را نشان داد. Jafar begloo et al. (2018) بیان کردند برای ۲۱ ایستگاه در شمال غرب ایران با استفاده از مدل HadCM3 و تحت سناریوهای A2 و B1 طول دوره سرما و یخبندان در ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد که میزان کاهش در ایستگاه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. در پژوهشی توسط Ghorbani و Valizadeh (2014) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در کل ایران، طول دوره یخبندان تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده نسبت به دوره آماری گذشته کاهش خواهد یافت. Abedi-Koupai et al. (2021) بیان کردند طول دوره یخبندان به‌طور میانگین برای ایستگاه اصفهان در مقایسه با میانگین طول دوره یخبندان برای اقلیم گذشته ایستگاه تحت سناریوهای انتشار $A_2$، $B_1$ و $A_1B$ به‌ترتیب به میزان ۱۰ روز، هفت روز و نه روز کاهش می‌یابد.

*DOI:* 10.22055/jise.2022.39312.2005

**جدول۵- نتایج محاسبات طول دوره یخبندان در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف**

**Table 5- Results of calculations of the average of the frost length (FL) in the past and future period under different scenarios**

| Station/ Scenario | Isfahan | Ardestan | Kashan | Shahreza | Chadegan | Khour Biabanak | Fereydun Shahr | Daran | Semirom | Naein | Najafabad | Natanz | Khansar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Past | 113 | 85 | 93 | 139 | 184 | 81 | 160 | 157 | 140 | 115 | 118 | 111 | 151 |
| SSP1-2.6 | 123 | 88 | 94 | 144 | 185 | 78 | 165 | 155 | 140 | 122 | 120 | 113 | 158 |
| SSP2-4.5 | 120 | 87 | 93 | 142 | 183 | 75 | 164 | 153 | 136 | 118 | 119 | 111 | 157 |
| SSP5-8.5 | 118 | 84 | 90 | 142 | 183 | 73 | 161 | 150 | 135 | 118 | 117 | 110 | 156 |

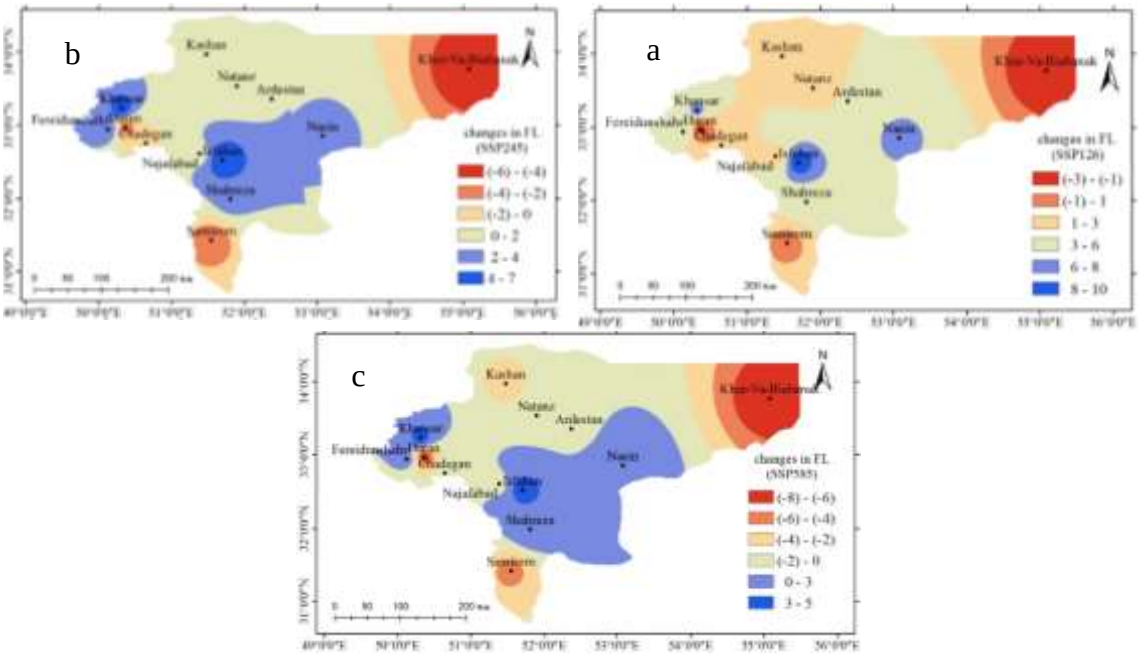



**Fig. 4- Zoning of changes in the frost length (FL) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period**

**شکل٤- پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره یخبندان دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته**

با توجه به تغییرات زمانی تعداد روزهای یخبندان در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت سناریوهای انتشار که در جدول (۶) ارائه شده است، بیشترین تعداد روزهای یخبندان مربوط به چادگان با ۱۴۹ روز و کمترین آن مربوط به خور و بیابانک با ۲۵ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار تعداد روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. پهنه‌بندی میزان تغییرات تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده تحت هر سه سناریو انتشار نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵) تغییرات تعداد روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها در سطح استان کاهشی می‌باشد. بیشترین تغییرات کاهشی مربوط به ایستگاه چادگان که تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۲۲، ۲۴ و ۲۶ روز کاهش می‌یابد.

Imani pour et al. (2019) با مقایسه نتایج در دوره پایه و آینده براساس خروجی مدل‌های گردش عمومی جو برای ایستگاه همدید گرگان بیان کردند که تعداد روزهای یخبندان در دوره پایه ۷۵ روز و سناریوهای خوشبینانه، حد واسط و بدبینانه به‌ترتیب ۴۶، ۳۹ و ۳۱ است که کاهش تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نسبت به دوره پایه مشهود است. همچنین نتایج این مقایسه حاکی از کاهش طول دوره یخبندان و افزایش طول دوره رشد می‌باشد.

Esmaeili et al. (2011) بیان کردند میزان تغییرات تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نسبت به دوره آماری گذشته در استان خراسان رضوی روندی کاهشی داشته، و به‌طور متوسط ۱۴ روز در سطح استان کاهش خواهد یافت.

**جدول٦- نتایج محاسبات میانگین تعداد روزها ی یخبندان در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف**

**Table 6- Results of calculations of the average number of frost days (FD) in the past and future period under different scenarios**

| Station/ Scenario | Isfahan | Ardestan | Kashan | Shahreza | Chadegan | Khour Biabanak | Fereydun Shahr | Daran | Semirom | Naein | Najafabad | Natanz | Khansar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Past | 68 | 32 | 39 | 85 | 149 | 25 | 128 | 118 | 91 | 60 | 73 | 56 | 104 |
| SSP1-2.6 | 59 | 24 | 26 | 72 | 127 | 15 | 109 | 101 | 77 | 50 | 62 | 41 | 88 |
| SSP2-4.5 | 58 | 25 | 25 | 71 | 125 | 16 | 109 | 101 | 75 | 49 | 60 | 40 | 88 |
| SSP5-8.5 | 56 | 23 | 23 | 69 | 123 | 15 | 105 | 97 | 73 | 46 | 57 | 38 | 86 |

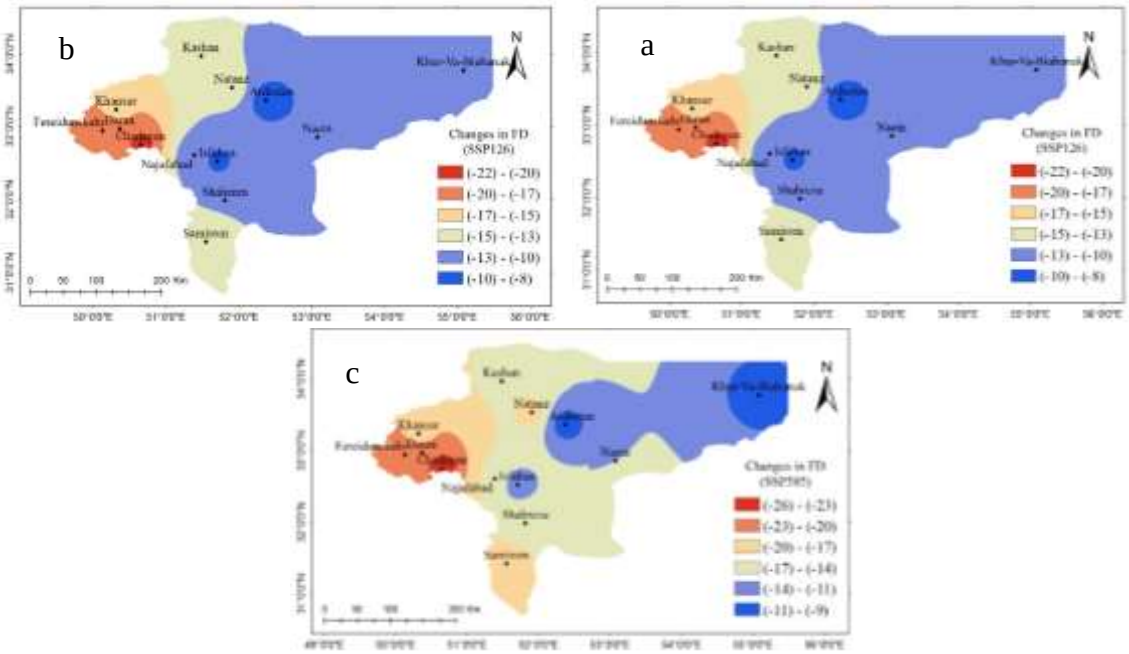



**Fig. 5- Zoning of changes in the number of Frost days (FD) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period**

**شکل۵- پهنه‌بندی میزان تغییرات تعداد روزهای یخبندان دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته**

**جدول۷- نتایج محاسبات میانگین طول دوره رشد (روز) در دوره آماری گذشته و آینده تحت سناریوهای مختلف**

**Table 7- Results of calculations of the average of growing season length (GSL) in the past and future period under different scenarios**

| Station/ Scenario | Isfahan | Ardestan | Kashan | Shahreza | Chadegan | Khour Biabanak | Fereydun Shahr | Daran | Semirom | Naein | Najafabad | Natanz | Khansar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Past | 128 | 141 | 139 | 116 | 91 | 146 | 108 | 108 | 128 | 132 | 127 | 136 | 118 |
| SSP1-2.6 | 133 | 157 | 150 | 125 | 108 | 159 | 120 | 121 | 130 | 142 | 138 | 155 | 127 |
| SSP2-4.5 | 135 | 156 | 151 | 128 | 109 | 159 | 121 | 122 | 133 | 147 | 138 | 156 | 128 |
| SSP5-8.5 | 137 | 157 | 152 | 128 | 112 | 160 | 122 | 123 | 133 | 148 | 140 | 158 | 128 |

*DOI:* 10.22055/jise.2022.39312.2005

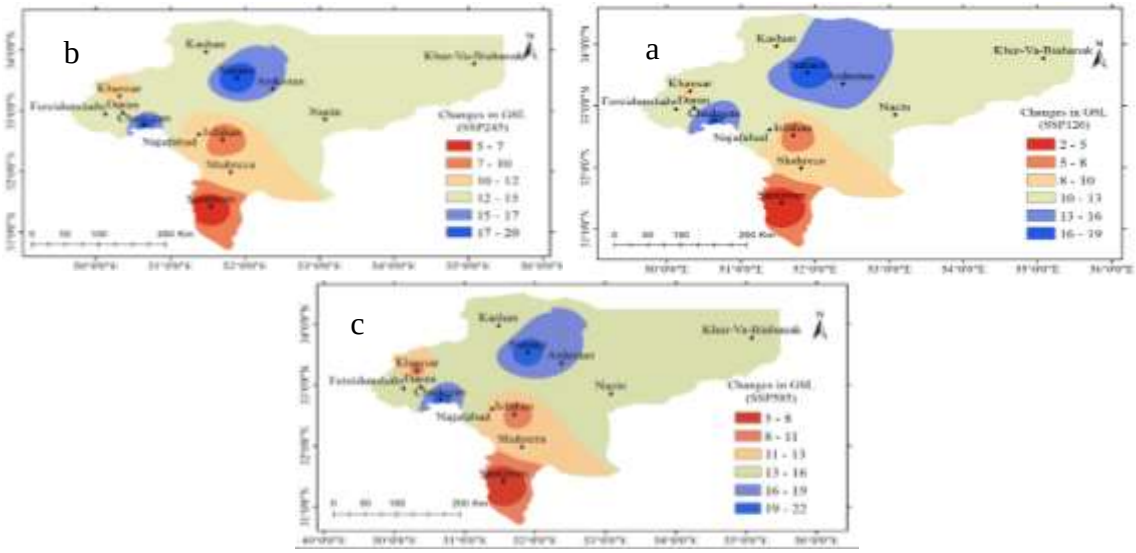



**Fig. 6- Zoning of changes in the growing season length (GSL) in the future based on (a) SSP126, (b) SSP245 and (c) SSP585 scenarios compared to the past period**

**شکل٦- پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره رشد دوره آینده تحت سناریوهای (a) SSP126، (b) SSP245 و (c) SSP585 نسبت به دوره آماری گذشته**

با توجه به تغییرات زمانی طول دوره رشد در دوره آماری گذشته و دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های مورد بررسی که در جدول (۷) ارائه شده است، بیشترین طول دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک با ۱۴۶ روز و کمترین آن مربوط به ایستگاه چادگان با ۹۱ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده نیز تحت هر سه سناریو طولانی‌ترین دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک و کوتاه‌ترین آن مربوط به چادگان است، اما تغییرات طول فصل رشد در همه ایستگاه‌ها افزایشی می‌باشد . پهنه‌بندی میزان تغییرات طول دوره رشد در دوره آینده تحت سناریوهای SSP126، SSP245 وSSP585 نسبت به دوره آماری گذشته در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به شکل (۶) بیشترین تغییرات طول دوره رشد مربوط به ایستگاه چادگان است که تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۱۷، ۱۸ و ۲۱ روز افزایش می‌یابد. Kheirandish et al. (2014) بیان کردند طول دوره رشد در دوره آینده نسبت به دوره گذشته در ایستگاه‌های مشهد، تهران، اصفهان، رشت و زاهدان افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش Esmaeili et al. (2011) نشان داد میزان تغییرات طول دوره رشد در دوره آینده نسبت به دوره آماری گذشته در استان خراسان رضوی روندی افزایشی داشته و به‌طور متوسط ۱۷ روز در سطح استان افزایش خواهد یافت.

## تأثیر تغییرات یخبندان‌ها بر عملکرد محصولات کشاورزی در دوره آینده

فصل بهار در ایستگاه‌های مختلف استان به‌طور هم‌زمان شروع نمی‌شود و رشد برخی از درختان زودگلده نظیر بادام و زردآلو زودتر از فصل بهار شروع می‌شود، بنابراین توجه به مراحل رشد گیاهان که هم‌زمان با این یخبندان‌ها می‌باشد اهمیت دارد. دماهای بحرانی مراحل مختلف رشد محصولات باغی و تاریخ جوانه زنی و گلدهی آلو، آلبالو، زردآلو، گیلاس و بادام به‌ترتیب در جدول (۸) و جدول (۹) ارائه شده است (Aslani, 2009). با توجه به جدول (۸) و جدول (۹) در صورتی که تاریخ وقوع آخرین یخبندان‌های دیررس بهاره در ایستگاه‌های مختلف، در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار، هم‌زمان با مراحل حساس رشد گیاه (مرحله گلدهی) باشد، احتمال وقوع یخبندان بهاره وجود دارد و میزان عملکرد محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد. با توجه به جدول (۴) در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار در ایستگاه‌های اصفهان، اردستان، کاشان، خور و بیابانک، نایین و نجف‌آباد تاریخ وقوع آخرین یخبندان بهاره زودتر از بقیه ایستگاه‌ها می‌باشد و ممکن است باعث آسیب به درختان زودگلده مانند بادام و زردآلو گردد.

با توجه به تغییرات تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته، طول دوره رشد در ایستگاه‌های مختلف تغییر می‌کند، بنابراین انتخاب زمان کشت مناسب و ارقام مقاوم به سرما و یخبندان در بازده تولیدی محصولات کشاورزی اهمیت دارد. در مورد درختان زودگلده در ایستگاه‌هایی که یخبندان دیررس بهاره زودتر اتفاق می‌افتد، بایستی ارقام دیرگلده کاشت گردند. کاهش طول دوره یخبندان می‌تواند آثار مثبتی در جهت افزایش طول دوره رشد و بالا بردن راندمان تولید غلات داشته باشد، از طرف دیگر، این کاهش می‌تواند دارای آثاری منفی شامل عدم تأمین نیاز سرمایی درختان یا عدم کنترل و از بین بردن آفات زراعی نیز باشد. به‌طور کلی افزایش طول دوره رشد، کاهش تعداد روزهای یخبندان و طول دوره یخبندان نتیجه منطقی از گرمایش جهانی است که منطبق بر نتایج به دست آمده از تحقیقاتی مشابه در سراسر دنیا است (Easterling et al., 2000).

**جدول۸- مقاومت درختان خزان‌دار در برابر درجه حرارت پایین بر حسب درجه سانتی‌گراد**

**Table 8- Resistance of trees to low temperatures in °C**

| growing steps | | | |
|---|---|---|---|
| Small green fruit | Full bloom | Buds closed but colored | Trees |
| -1.7 | -2 to -4 | -3 to -5 | Almond |
| -0.6 | -0.6 | -1 | grape |
| -1.1 | -1.1 | -1 | Walnut |
| -1.7 | -2.2 to -2.8 | -3.5 to -4.5 | Apple |
| -0.6 | -2.2 | -4 | Apricot |
| -1.1 | -2.2 | -2.2 | Cherries |
| -1.1 | -2.2 | -2.5 to -3.3 | pear |

**جدول ۹- جدول اطلاعات مربوط به چند نمونه از محصولات باغی استان**

**Table 9- Information about some horticultural products in the province**

| Maximum harvest time | Flower time | Date of bud swelling | City | Product |
|---|---|---|---|---|
| 5 Jul | 20 Apr to 20 May | 20 Mar to19 Apr | Shahreza | Cherries |
| 30 Jun | 24 Apr | 8 Apr | Najafabad | |
| 10 Jul | 29 Mar | 9 Mar | Isfahan | |
| 10 Jul | 8 Apr | 4 Mar | Najafabad | Plum |
| 5 Aug | 4 May | 20 Apr | Fereydun Shahr | |
| 30 Jun | 20 Mar | 14 Mar | Shahreza | |
| 21 Jul | 20 Mar | 19 Mar | Shahreza | |
| 5 Jul | 24 Mar to 29 Mar | 23 Feb to 4 Mar | Isfahan | Apricot |
| 22 Aug | 20-Apr | 20 Mar to 3 Apr | Fereydun Shahr | |
| 21 Jul | 8 Apr | 4 Mar to 19 Mar | Najafabad | |

## نتیجه گیری

همه ساله وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره به دلیل هم‌زمانی با مراحل حساس زندگی گیاه باعث ایجاد خسارت و کاهش بازده محصولات زراعی و باغی در مناطق مختلف جهان می‌گردد. در دوره آماری گذشته، میانگین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه مربوط به ایستگاه‌های چادگان، داران، فریدون‌شهر و شهرضا می‌باشد و میانگین آخرین یخبندان دیررس بهاره در ایستگاه‌های خور و بیابانک و اردستان زودتر از بقیه ایستگاه‌ها اتفاق می‌افتد. در دوره آماری آینده نیز تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره تحت هر سه سناریو انتشار مربوط به ایستگاه‌های ذکر شده می‌باشد و تغییرات افزایشی وکاهشی در تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه و آخرین یخبندان دیررس بهاره در سطح استان در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته مشاهده گردید. در ایستگاه چادگان میانگین زودترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه تحت سناریو انتشار SSP585 یک روز دیرتر نسبت به دوره آماری گذشته و در ایستگاه خور و بیابانک میانگین دیرترین تاریخ وقوع اولین یخبندان زودرس پاییزه تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب سه، پنج و شش روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهند. در ایستگاه چادگان میانگین دیرترین تاریخ وقوع آخرین یخبندان دیررس بهاره تحت سناریو انتشار SSP126، یک روز دیرتر نسبت به دوره آماری گذشته و در ایستگاه اردستان تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب پنج، چهار و سه روز دیرتر از دوره آماری گذشته رخ می‌دهد. با دانستن تاریخ آخرین یخبندان دیررس بهاره نیز می‌توان تاریخ کاشت بسیاری از گیاهان زراعی و باغی را تعیین نمود. با توجه به اینکه دمای صفر درجه برای برخی از محصولات کشنده می‌باشد، باید زمان کاشت را طوری انتخاب نمود که مراحل حساس رشد گیاه با یخبندان بهاره مواجه نشود. تغییرات طول دوره یخبندان، تعداد روزهای یخبندان و طول دوره رشد در دوره آماری آینده نسبت به دوره آماری گذشته در سراسر استان مشاهده گردید. طولانی‌ترین دوره یخبندان در دوره آماری گذشته در چادگان با ۱۸۴ روز و کوتاه‌ترین آن در خور و بیابانک با ۸۱ روز مشاهده گردید که در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار، طول دوره یخبندان در ایستگاه چادگان و خور و بیابانک کاهش می‌یابد. بیشترین تعداد روزهای یخبندان مربوط به چادگان با ۱۴۹ روز و کمترین آن مربوط به خور و بیابانک با ۲۵ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده تحت هر سه سناریو انتشار تعداد روزهای یخبندان در همه ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین طول دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک با ۱۴۶ روز و کمترین آن مربوط به ایستگاه چادگان با ۹۱ روز می‌باشد. در دوره آماری آینده نیز تحت هر سه سناریو طولانی‌ترین

*DOI:* 10.22055/jise.2022.39312.2005

دوره رشد مربوط به ایستگاه خور و بیابانک و کوتاه‌ترین آن مربوط به چادگان است. بیشترین تغییرات طول دوره رشد مربوط به ایستگاه چادگان است که تحت سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۱۷، ۱۸ و ۲۱ روز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی افزایش طول دوره رشد، کاهش تعداد روزهای یخبندان و طول دوره یخبندان نتیجه منطقی از گرمایش جهانی است. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در زمان کاشت محصولات زراعی و باغی به تاریخ وقوع یخبندان‌ها در هر منطقه توجه شود و ارقام مقاوم به سرما و همچنین دیرگلده در اولویت کشت قرار گیرند تا در مواجه با سرما و یخبندان دچار کاهش بازده محصولات کشاورزی نشوند.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه صنعتی اصفهان و سازمان هواشناسی کشور به‌دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم برای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

## References

1-Abedi-Koupai, J., Rahimi, S. and Eslamian, S. S., 2021, Effects of climate change on the probability of occurrence of the first fall frost and the last spring frost (Case study: Isfahan). *Journal of Water and Soil Science*, *25* (3), pp.31-44. DOI: 10.47176/jwss.25.3.49822. (In Persian).

2- Agha Shariatmadari, Z., Baszrafshan, J. and Safaei, S.E., 2016. Projection of the early fall and late spring frosts under climate change condition with SDSM model in several selected stations in the mid-western Iran. *Journal of Agricultural Meteorology*, *4*(1), pp. 22-31. (In Persian).

3- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M.M. and Ismail, M., 2020. Projections of precipitation and temperature over the south Asia countries in CMIP6. *Earth System and Environment*, *4*, pp. 297–320.

4- Aslani, A., 2009. Analyzing of the Intensive Frosts of Zayandehroud Basin, Thesis, *Yazd University*, Iran. 170p. (in Persian).

5- Behyar, M. B., Kheyrandish, M., Zamanian, M. 2013. 'Investigation of climate change effects on early autumn chilling and late spring chilling in Iran using SDSM', *Journal of Climate Research*, 1392(15), pp. 117-128. (In Persian).

6- Easterling, D.R., Evans, J.L., Groisman, P., Karl, T., Kunkel, E. and Ambenje, P., 2000. Observed variability and trend in extreme climate events. *Bulletin of the American Meteorological Society*. *81* (3), pp. 417–425. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2.

7- Esmaeili, R., Gandomkar, A. and Ghayoor, H. A., 2011. Zoning of climate changes rate base on agriculture approach in future climatic period (case study Khorasan Razavi province). *Journal of Geography and Environmental Planning*, *41*(1), pp. 35-52. (In Persian).

8- Ghorbani, Kh. and Valizadeh, A., 2014. Study of the date of the frosts and effective colds in agriculture affected by climate change (Case study: Mashhad, Tabriz and Qazvin). *Journal of Water and Soil Conservation*, *21*(4), pp. 197-214. DOR: 20.1001.1.23222069.1393.21.4.10.1. (In Persian).

9- Graczyk, D. and Kundzewicz, Z. W., 2016. Changes of temperature- related agro climatic indices in Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, pp. 401-410.

10- Gu, H., Yu, Z., Wang, J., Ju, Q., Yang, Ch. and Fan, Ch., 2014. Climate change hotspots identification in China through the CMIP5 global climate model ensemble. *Advances in Meteorology*, *963196*, pp. 1-10.

11- Hidalgo Galvez, M.D., Garcia Mozo, H., Oteros, J., Mestre, A., Botey, R. and Galan, C., 2018: Phonological behavior of early spring flowering trees in Spain in response to recent climate changes. *Theoretical and Applied Climatology*, *132* (1-2), pp. 263-273.

12- Imani pour, H., Kashki, A. R and Firooz yazdi, M., 2019. Detection of the first frost of autumn and the last frost of spring with the climate change approach at Gorgan synoptic station. *Journal of Agroecology*, *15*(3), pp. 49-58. DOI: 10.22034/AEJ.2019.672649. (In Persian).

13- Jafar begloo, N., Khorshid dust, A.M., Rezaei banafsheh, M., Rostam zadeh, D., 2018. Investigation of changes in the beginning and end of frost and effective colds in agriculture under climate change conditions in northwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, *5*(4), pp. 49–64. (in Persian).

14- Kheirandish, M., Ghahreman, N. and Bazrafshan, J., 2014. A study of the effects of climate change on length of growing season in several climatic regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *44*(2), pp. 143-150. (In Persian).

15- Modala, N.R., Ale, S., Goldberg, D.W., Olivares, M., Munster, C.L., Rajan, N. and Feagin, R.A., 2017. Climate change projections for the Texas high plains and rolling plains. *Theoretical and Applied Climatology*, *129*, pp. 263-280.

16- Nasr Isfahani, M. and Yazdan panah, H., 2019. Prediction of frost in almond orchards in Najafabad region. *Physical Geography Research Quarterly, 51*(3), pp. 497-512. DOI: 10.22059/jphgr.2019.281346.1007380(In Persian).

17- Omidvar, K. and Aslani, A., 2014. Analyzing of the Intensive Frosts of Zayanderoud Basin. *Geographical Research Quarterly*, *29*(3), pp. 147-164. (In Persian).

18- Qian, B., Gameda, S., Zhang, X. and Jong, R.D., 2012. Changing growing season observed in Canada. *Climate Change*, *112*(2), pp. 339–353.

19- Rezaei Banafsheh Dargh, M., Jahanbakhsh Asl, S., Khorshid Dust, A.M. and Ali Mohammadi, M., 2019. Perspective of temporal and spatial changes in the occurrence of early fall and late spring frosts and colds in the northeast of the country. *Physical Geography Quarterly, 43*, pp.1-14. (In Persian).

20- Seyyed Nezhad Golkhatmi, N., Farzandi, M. and Pazhand, H.R., 2017. The occurrence of early autumn frost frequency analysis case study: Khorasan Razavi's synoptic stations. *Journal of Water and Soil*, *31*(1), pp. 312-320. (In Persian).

21- Sobhani, B., Ganji, M., and Goldust, A., 2017. Determining and evaluating the beginning and end dates of early and late frost and the probability of its duration, intensity and frequency in Ardabil province in the statistical period 1996 to 2010. *Physical Geography Research Quarterly, 1*, pp. 39-53. DOI: 10.22059/jphgr.2017.61578. (In Persian).

22- WMO, 2011. WMO statement on the status of the global climate in 2010. Word meteorological organization, Geneva.

23- Xiao, L., Liu, L., Asseng, S., Xia, Y., Tang, L., Liu, B., Cao, W. and Zhu, Y., 2018. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *260*, pp. 154-164. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.006.

24- Yu, L., Zhong, S., Bian, X., Heilman, W.E. and Andresen, J. A., 2014. Temporal and spatial variability of frost- free seasons in the Great lakes region of the United States. *Climatology*, *34* (13), pp. 3499-3514. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.3923

25- Zhang, D., Xu, W., Li, J., Cai, Z. and An, D., 2014. Frost free season lengthening and its potential cause in the Tibetan Plateau from 1960 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology, 115*, pp. 441-450.

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 39-57**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**Research Paper**

**EXTENDED ABSTRACT**

# Assessing the Economic Efficiency of Water Distribution in the Agricultural Sector through Crop Pattern Modification (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network)

H. Mazandarani Zadeh[1]* and S. M. Hosseini[2]

*1*- Corresponding Author, Associated professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir)*

*2- PhD sudent in Water Resources Engineering, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 12 March 2023
Revised: 13 July 2023
Accepted: 15 July 2023

*Keywords:*
Productivity, Farmers' income, Water price, Water resource management.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Mazandarani zadeh, H., Hosseini, S. M. (2025). 'Assessing the Economic Efficiency of Water Distribution in the Agricultural Sector through Crop Pattern Modification (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network)', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 39-57. doi: 10.22055/jise.2023.43268.2061.

## Introduction

There are various methods to enhance water productivity, including the utilization of management tools such as water pricing policies. However, the lack of proper pricing of agricultural water and the absence of real water prices for beneficiaries have resulted in water being considered a low-value commodity that beneficiaries use without proper consideration or management (Kazem Attar et al., 2020**).** The widening gap between water supply and demand in the future highlights the need for serious attention to the fundamentals of economic planning of water resources and its optimal allocation, along with proper management of water resources. In Qazvin plain, the agricultural sector bears a significant burden of job creation, and many people rely on it for their livelihoods. Effective water resources management should not only meet the long-term needs of stakeholders but also preserve groundwater resources. However, it is important to consider whether farmers in all regions can afford to pay the actual price of water, and if the cropping pattern of different regions should affect water pricing. Therefore, the aim of this study was to determine the real price of water by calculating its cost and evaluating farmers' income with the current water cultivation and distribution patterns in case of water supply at actual prices. The study also investigated the impact of two optimization models, including A- optimization of cropping pattern and B- simultaneous optimization of cropping pattern and water distribution on farmers' income when the water supply is at the actual price in the Qazvin plain irrigation network. Finding answers to these questions is a critical step in achieving economic efficiency in water consumption within the framework of integrated water resources management.

## Materials and Methods

### Calculate the cost of water

The study employed the engineering economy approach to calculate the cost of each cubic meter of water. This approach considers all capital costs, operation and maintenance expenses of facilities,

and other relevant costs throughout the entire lifespan of the project. By creating a cash flow table of costs, the total cost of water is calculated using this method of engineering economics (Tahamipour Zarandi and Yazdani, 2016).

**Yield function**

To estimate the quantity of product produced based on the volume of water consumed, the water-production relationship presented by Rao et al. (Rao et al., 1988) was employed. According to equation (1), the yield function of crops during various growth periods has a linear correlation with the volume of water consumed.

$$\frac{Ya}{Ym} = \prod_{i=1}^{n} [1 - Ky_i(1 - \frac{AET_i}{PET_i})] \quad (1)$$

where Ya is the actual yield in tons per hectare, Ym is the potential yield in tons per hectare, Kyi is the coefficient of sensitivity of the crop to water deficit during the i-th growth period, AETi is the amount of water given to the plant (evaporation or actual transpiration) during the i-th growth period in cubic meters, PETi is the water requirement of the plant (potential evapotranspiration) during the i-th growth period in cubic meters, and n is the number of growth periods for each plant.

**Productivity**

There are different types and numbers of productivity indicators depending on different perspectives. In this study, the financial index of water efficiency was used, which is in line with the main objective. This index is the ratio of net income per unit of water volume, also known as Net Benefit Per Drop.

## Results and Discussion

The estimated price of each cubic meter of water using economic and engineering relations was 8,595 rials. In the current situation (water supply at the price of 940 Rials), the Qazvin Plain irrigation network's income is approximately 89 billion Tomans. However, if each cubic meter of water is supplied at the price of 8,595 Rials, the current model of water cultivation and distribution not only fails to generate income for farmers but also causes them harm. Through the optimization of the cultivation pattern, the income of the Qazvin Plain irrigation network can increase to about 101 billion Tomans. Simultaneously optimizing the cultivation pattern and water distribution can lead to an income of approximately 233 billion Tomans. The Net Benefit Per Drop (NPBD) increases by an average of 40% by optimizing the cultivation pattern and by an average of 389.6% by simultaneously optimizing the cultivation and water distribution pattern compared to the current situation where each cubic meter of water is supplied at 940 Rials. However, in the case of supplying each cubic meter of water at the price of 8,595 Rials and not changing the cultivation and water distribution pattern, the average NPBD will decrease by 289.4% compared to the current situation. By optimizing the cultivation pattern, it is found that with the increase in water price and decrease in gross profit, the model tends to cultivate crops that have higher yield and less sensitivity to water stress. According to this, sugar beet and potato are the most suitable crops for cultivation in the Qazvin Plain irrigation network. Although other crops, such as wheat and barley, have low sensitivity to water stress, their low yield and subsequent decline in the irrigation network's income make them less desirable for cultivation.

## Result

The price of water is one of the important economic variables that can play a significant role in the optimal use of water resources in the agricultural sector. By implementing water pricing policies,

the final cost of production increases, and it becomes essential to select a crop combination that yields higher benefits per unit of water. This study focuses on estimating the total cost of each cubic meter of water using engineering-economic relationships and its impact on the economy of farmers under two optimization models: optimizing the cropping pattern and simultaneously optimizing the cropping pattern and water distribution. The total cost of each cubic meter of water was estimated at 8,595 rials, and the results showed that the current cropping pattern is not suitable if the price of water increases. However, by optimizing the cropping pattern and simultaneously optimizing the cropping pattern and water distribution, it is possible to achieve an income approximately 14.7% and 162.7% higher than the current situation where the price of each cubic meter of water is 940 rials, respectively.

**Acknowledgments**

The Qazvin Regional Water Company expresses its utmost gratitude and appreciation to the Agricultural Jihad Organization, which has cooperated in carrying out this research.

**Reference**

1- Kazem Attar, H., Noory, H. and Ebrahimian, H., 2020. Effect of water pricing on persuading farmers to use modern irrigation systems and increasing the economic productivity of irrigation water (Case study: Qazvin Plain Irrigation Network). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *14*(2), pp.616-625. (In Persian)

2- Rao, N.H., Sarma, P.B.S. and Chander, S., 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, *13*(1), pp.25-32.

3- Tahamipour zarandi, M, and Yazdani, S., 2016. The Role of Economic Instruments in IWRM: The Case Study of Irrigation Water Pricing in Western Basins of Iran. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research, 47*(3), pp.545-556. (In Persian)

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۵۷-۳۹

# بررسی بازده اقتصادی توزیع آب بر مبنای قیمت تمام شده آب در بخش کشاورزی با استفاده از اصلاح الگوی کشت (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین)

حامد مازندرانی زاده[1*] و سیده مرضیه حسینی[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران (mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir)

۲- دانشجو دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

## چکیده

**یکی از راهکارهای مدیریت منابع آب در اقتصاد کشاورزی، قیمت‌گذاری صحیح آب است. تغییر قیمت آب بر معیشت کشاورزان اثرگذار است؛ لذاتغییر قیمت آب باید به گونه‌ای باشد که تأمین معیشت کشاورزان در آن لحاظ شده باشد. در این پژوهش به بررسی اثر عرضه آب با قیمت واقعی بر درآمد کشاورزان در شبکه آبیاری دشت قزوین در سال ۱۳۹۸ پرداخته شد. بدین منظور از اطلاعات موجود شامل هزینه‌های احداث شبکه، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری استفاده شد و قیمت تمام شده هر متر مکعب آب با استفاده از روش‌های اقتصاد مهندسی ۸۵۹۵ ریال در شبکه آبیاری دشت قزوین برآورد گردید و در ادامه، ارائه دو مدل بهینه-سازی الگوی کشت و بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک در دستور کار قرار گرفت. نتایج نشان داد قیمت فعلی آب بسیار پایین‌تر از بهای تمام شده آن بوده و در صورت عرضه آب به قیمت تمام شده، الگوی فعلی کشت و توزیع آب مناسب نیست و با بهینه‌سازی الگوی کشت متوسط شاخص بهره‌وری مالی از آب و درآمد شبکه به‌ترتیب حدود ٤٠ و ١٤/٧٠ درصد و با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب متوسط شاخص بهره‌وری مالی از آب و درآمد شبکه به‌ترتیب حدود ٣٨٩/٦ و ١٦٢/٧درصد نسبت به وضعیت فعلی که قیمت هر متر مکعب آب ٩٤٠ ریال است افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد بر خلاف تصور رایج، افزایش قیمت آب نه تنها می تواند منجر به حفظ ذخایر آب زیر زمینی شود بلکه حتی می‌تواند منجر به بهبود معیشت کشاورزان نیز شود.**

**کلید واژه‌ها:** بهره‌وری، درآمد کشاورزان، قیمت آب، مدیریت منابع آب.

## مقدمه

کشاورزی یکی از ارکان اساسی و زیربنایی اقتصاد کشور است که علاوه بر تأمین نیازهای غذایی، موجب کسب درآمد و ایجاد اشتغال برای بخش عمده‌ای از نیروی کار جامعه می‌شود (Badibarzin et al., 2019). بیشترین مصرف آب در بخش کشاورزی و آبیاری مزارع است که بیش از ۷۰ درصد و در برخی مناطق تا ۹۰ درصد از کل آب شیرین جهان را در بر می‌گیرد (Biniaz et al., 2021). با توجه به محدودیت منابع آب و اهمیت کشاورزی در اقتصاد کشور لازم است با اتخاذ تدابیر اصولی به راهکارهایی برای عبور از بحران پیش‌رو اندیشید.

در ایران در طی سال‌های گذشته به دلایل متعددی نظیر استحصال بی‌رویه و غیر منطقی از منابع آب موجود به ویژه آب‌های زیرزمینی، بروز مشکلاتی از قبیل خشکسالی و عدم رعایت حفاظت در بهره‌برداری از منابع آبی، برخی از منابع آبی کشور نابود شده و یا در معرض نابودی قرار گرفته‌اند. در این راستا به‌منظور جبران کمبود آب و افزایش تولید غذا، ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی در درجه اول اهمیت و اعتبار قرار دارد (Ghaderzadeh et al., 2017).

راهکارهای بسیاری برای بالا بردن بهره‌وری آب وجود دارد که می‌توان به بهره‌گیری از ابزارهای مدیریتی شامل سیاست‌های قیمت‌گذاری آب اشاره نمود. متأسفانه به‌دلیل عدم وجود قیمت‌گذاری صحیح آب کشاورزی و عدم پرداخت قیمت واقعی آب توسط بهره‌برداران، آب به مثابه کالای بی‌ارزشی محسوب می‌گردد که بهره‌برداران با هر روشی که ترجیح می‌دهند از آن بهره می‌جویند (Kazem Attar et al., 2020). بر این اساس، تداوم افزایش شکاف میان عرضه و تقاضای آب در آینده، توجه جدی به مبانی برنامه‌ریزی اقتصادی منابع آب و تخصیص بهینه آن را اجتناب ناپذیر کرده و مدیریت صحیح منابع آب را ضروری می‌سازد.

Balali و Kasbian Lal (2022) با بهره‌گیری از الگوی برنامه‌ریزی پویا با استفاده از نرم افزار GAMS در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ به ارزش‌گذاری اقتصادی منابع آب زیرزمینی در دشت همدان- بهار پرداختند. بر اساس نتایج تحقیق ارزش اقتصادی آب زیرزمینی به ازای هر متر مکعب آب در چهار ناحیه دشت همدان- بهار شامل منطقه همدان۳۵۴۳ ریال، منطقه لالجین ۴۵۳۸ ریال، منطقه بهار ۴۰۱۵ و منطقه صالح آباد ۳۶۹۰

ریال محاسبه گردید. همچنین بررسی و مقایسه ارزش اقتصادی برآورد شده با قیمت آب در نواحی مورد مطالعه نشان داد که ارزش اقتصادی محاسبه شده هر متر مکعب آب بیشتر از قیمت فعلی آب در منطقه است، به‌طوری‌که افزایش هزینه استفاده این نهاده از طریق ابزارهای مختلف سیاستی نظیر وضع قیمت آب می‌تواند نقش مؤثری در کنترل بهره‌برداری و تخلیه آبخوان داشته باشد.

Siasar و Salari (2022) با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات آشوبناک (Chaotic Particle Swarm Algorithm) به بهینه‌سازی الگوی کشت دشت سیستان با اهداف حداکثر سازی بازده اقتصادی، حداقل‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب با اعمال کم آبیاری پرداختند. نتایج مدل بهینه‌سازی نشان داد الگوی کشت فعلی بهینه نبوده و با اجرای الگوی پیشنهادی مدل، سود حاصل به ازای واحد سطح زیر کشت افزایش خواهد یافت. نتایج کاربرد کم آبیاری طی دوره‌های مختلف رشد محصولات گندم، یونجه، سورگوم، هندوانه و انگور نشان داد که اعمال کم آبیاری‌ها در این دشت استراتژی مناسبی نبوده و تنها استراتژی آبیاری کامل توصیه می‌گردد. همچنین نتایج ارزیابی حساسیت مدل نیز نشان داد که در قیمت‌های پایین آب، کشاورزان واکنش کمتر و در قیمت‌های بالاتر، عکس‌العمل بیشتری به تغییر قیمت نشان داده و با افزایش قیمت آب، سود ناخالص کمتر و مدل بیشتر به سمت افزایش سطح زیر کشت محصولاتی تمایل دارد که با مصرف کمتر آب عملکرد بیشتری دارند. همچنین نتایج نشان داد که در دامنه قیمتی ۷۲۵- ،۰ ،۹۵۰- ،۷۵۰ ،۱۰۵۰- ،۱۰۰۰ و ۱۲۰۰- ۱۰۷۵ ریال تقاضای آب بی کشش است و در برنامه‌ریزی‌های مربوط به منابع آب منطقه بایستی مورد توجه قرار گیرد.

Shirzadi Laskookalayeh et al. (2018) به بررسی اثر سیاست قیمت‌گذاری آب آبیاری بر سطح تراز آب زیرزمینی حوضه آبریز نیشابور با استفاده از مدل ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت و روش پویایی سیستم پرداختند. نتایج نشان داد که اعمال سیاست قیمتی موجب کاهش سود ناخالص، کاهش مصرف آب و افزایش سطح آب زیرزمینی می‌شود.

Qu et al. (2022) در گانسو چین به بررسی افزایش قیمت آب کشاورزی و سیاست حمایتی یارانه پرداختند. در این مطالعه از مدل تعادل عمومی قابل محاسبه ( Computable General Equilibrium) برای سیاست قیمت‌گذاری آب کشاورزی استفاده کردند. نتایج نشان داد که اصلاح قیمت‌گذاری آب موجب ارتقا حفظ آب و بهبود کارایی مصرف آب می‌شود. همچنین یارانه می‌تواند تأثیر منفی سیاست قیمت‌گذاری آب بر اقتصاد کشاورزی را کاهش دهد. Chu و Grafton (2020) به بررسی قیمت‌گذاری و ارزش افزوده آب در ویتنام پرداختند نتایج نشان داد قیمت‌گذاری آب می‌تواند استفاده از آب را تا ۸۴ درصد کاهش دهد البته این در حالی‌ست که سود کشاورز تا ۱۷ درصد کاهش پیدا خواهد کرد.

Sahin et al. (2018) با در نظر گرفتن این موضوع که قیمت‌گذاری و محدودیت استفاده از آب دو راهکار برای کاهش تقاضا هست، در یک مدل‌سازی مشارکتی روش محدود کردن در استفاده از آب و ساختار قیمت‌گذاری در سطوح مختلف در کوئیزلند استرالیا را با هم مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که ساختار قیمت‌گذاری نسبت به محدود کردن مصرف از سوی مصرف‌کنندگان مورد استقبال بیشتری قرار خواهد گرفت.

Zhou et al. (2015) در حوضه رودخانه حیه در شمال غرب چین به بررسی شدت تأثیر قیمت آب بر مدیریت منابع آب پرداختند. کشش قیمتی تقاضا آب کشاورزی بر اساس تابع تقاضای آب آبیاری برآورد شد. نتایج نشان داد که قیمت آب آبیاری کشاورزی از نظر آماری معنی‌دار است، اما کشش آن در قیمت‌های پایین خیلی کم است. همچنین واکنش کشاورزان به افزایش قیمت ضعیف است. برای ایجاد انگیزه برای حفظ آب و بهبود کارایی آبیاری، مکانیسم قیمت بایستی بر مبنای حقوق قابل اجرای آب، اندازه‌گیری سهمیه آب، اصلاح مراجع آب و نظرات تعاونی‌های آب‌بر همراه شود. افزون بر این، افزایش قیمت آب آبیاری ممکن است منجر به استخراج و استفاده بیش از حد آب‌های زیرزمینی شود. در نتیجه کاهش مجوز بهره‌برداری و وضع مالیات بر آب‌های زیرزمینی می‌تواند از کاهش بیشتر سطح آبخوان جلوگیری کند.

بررسی اثر سیاست قیمت‌گذاری آب بر تقاضای منابع آب کشاورزی کشور غنا نشان داد که چنانچه قیمت آب به مقداری زیاد افزایش یابد، سیاست قیمت‌گذاری آب تأثیر منفی بر تقاضای منابع آب در غنا دارد. اگر قیمت آب زیاد باشد تأثیر منفی بر فعالیت‌های کشت، درآمد کشاورزان، اشتغال و تنوع محصول دارد. از این رو به منظور حداقل سازی و کاهش تلفات پیشنهاد شد که اطلاع‌رسانی‌های لازم در زمینه کمبود آب به کشاورزان داده شود تا ضمن آگاهی یافتن از کمبود منابع آب نسبت به بکارگیری فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، بهتر متقاعد شوند (Aidam, 2015).

بار بزرگی از ایجاد اشتغال در دشت قزوین بر عهده بخش کشاورزی قرار گرفته است و عده زیادی در این بخش مشغول به کار هستند. از طرفی دشت قزوین از جمله مناطقی از کشور است که با کمبود شدید آب مواجه است و وجود بیش از ۲۵۰۰ حلقه چاه غیرمجاز در استان با حجم برداشت ۳۵۰ میلیون متر مکعب باعث افت مستمر سطح آب زیرزمینی شده است که این موضوع آثار نامطلوبی از جمله کاهش شدید آبدهی چاه‌ها، خشک شدن قنات‌ها، شوری و کاهش کیفیت آب زیرزمینی، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی، از بین رفتن کیفیت خاک، تحمیل هزینه‌های زیاد بر مالکان چاه‌های مجاز، ایجاد مشکل اساسی در تأمین آب شرب شهرها و روستاها و در نهایت فرونشست زمین را در پی داشته است ( Hosseini and Mazandarani zadeh, 2021). بنابراین تداوم اشتغال این جمعیت، وابسته به مدیریت

*DOI:* 10.22055/jise.2023.43268.2061

صحیح منابع آب است. مدیریت منابع آب باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر تأمین نیاز ذینفعان در دراز مدت، منابع آب زیرزمینی را هم حفظ نماید. در اکثر مطالعات انجام شده بر نقش افزایش قیمت آب بر بهبود مدیریت منابع آب تأکید شده است، اما این سوال مطرح است که آیا کشاورزان در همه مناطق توانایی پرداخت چنین قیمتی را دارند؟ آیا الگوی کشت مناطق مختلف نباید در قیمت‌گذاری دخالت داده شود؟ بنابراین، هدف مطالعه حاضر تعیین قیمت واقعی آب با محاسبه هزینه تمام شده آن و بررسی درآمد کشاورزان در وضعیت فعلی الگوی کشت و توزیع آب در صورت عرضه آب به قیمت واقعی و سپس بررسی تأثیر دو مدل بهینه‌سازی شامل الف- بهینه‌سازی الگوی کشت و ب- بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب بر درآمد کشاورزان در صورت عرضه آب به قیمت واقعی در شبکه آبیاری دشت قزوین است تا با یافتن پاسخ سوالات، گامی مؤثر در دستیابی به کارایی اقتصادی مصرف آب در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب برداشته شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری دشت قزوین در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر تهران واقع شده است. هدف از احداث این شبکه انتقال آب طالقان از طریق سد انحرافی به دشت قزوین است. شبکه دارای ۱۲۰۰ کیلومتر کانال‌های درجه یک تا چهار و ۶۰ هزار هکتار اراضی خالص کشاورزی است. محدوده شبکه از روستای زیاران در شهرستان آبیک تا روستای کهک در شهرستان تاکستان ادامه دارد. شکل (۱) موقعیت این شبکه را نشان می‌دهد. اراضی موجود در شبکه بر اساس موقعیت به ۵۳۰ بخش تقسیم شده است که هر بخش تحت عنوان یک طرح است. هر طرح دارای یک یا چند نماینده است که سالانه توسط بهره‌برداران هر طرح مشخص می‌شوند و مسئول دریافت آب از کانال‌های درجه دو و توزیع آن بین بهره‌برداران هستند (Kazem Attar et al., 2020). نحوه توزیع آب در شبکه از ابتدای تأسیس، به‌صورت حجمی و بر اساس قراردادهای سه جانبه بین سازمان جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه‌ای و بهره‌برداران تحت عنوان طرح کشت بوده است. طرح کشت نشان‌دهنده‌ی میزان آب مورد نیاز هر طرح بر اساس ترکیب کشت موجود در طرح است که هر ساله توسط سازمان جهاد کشاورزی تهیه و به شرکت آب منطقه‌ای برای توزیع ابلاغ می‌گردد و ملاک توزیع آب در شبکه است. قیمت آب بها در شبکه هر ساله توسط شرکت آب منطقه‌ای و بر اساس قانون تثبیت آب بهای زراعی محاسبه و از کشاورزان دریافت می‌گردد. قانون آب بهای در سال ۱۳۶۹ توسط مجلس شورای اسلامی تصویب گردید. بر اساس این قانون متوسط آب بهای دریافتی از کشاورزان و زارعین با توجه به اولویت‌های تخفیف برای زراعت‌های استراتژیک شامل سه درصد، دو درصد و یک درصد ارزش محصول کاشته شده به‌ترتیب برای آب‌های تنظیم شده و شبکه‌های مدرن، آب‌های تنظیم شده و کانال‌های تلفیقی و آب‌های تنظیم شده و کانال‌های سنتی است. سال مورد مطالعه در این پژوهش ۱۳۹۸ است مقدار آب تخصیص یافته از سد طالقان به شبکه آبیاری دشت قزوین ۳۳۰/۷۵ میلیون مترمکعب و قیمت هر متر مکعب آب در این سال ۹۴۰ ریال (شبکه آبیاری مدرن) است. جدول (۱) الگوی توزیع آب تخصیص یافته از سد طالقان، جدول (۲) سطح زیر کشت هر بهره‌بردار و جدول (۳) هزینه عملیات کشاورزی بدون در نظر گرفتن هزینه خرید آب، عملکرد متوسط و قیمت فروش محصولات زراعی در شبکه آبیاری دشت قزوین را نشان می‌دهد.

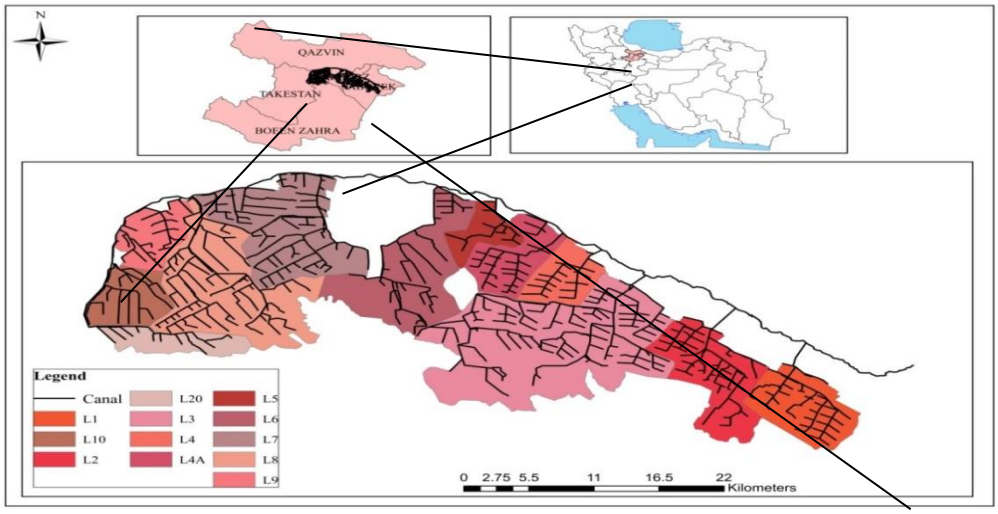



**Fig1- Study area**

**شکل ۱- منطقه مورد مطالعه**

**جدول ۱- الگوی توزیع آب تخصیص‌یافته از سد طالقان به شبکه آبیاری دشت قزوین بر حسب هزار مترمکعب (شرکت آب منطقه‌ای قزوین)**

**Table 1- Water distribution pattern allocated from Taleghan Dam to Qazvin Plain irrigation network in thousand cubic meters (Qazvin Regional Water Company)**

| Month / Beneficiary | Far. | Ord. | Kho. | Tir | Mor. | Sha. | Meh. | Aba. | Aza. | sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 78.8 | 175.4 | 66.0 | 870.3 | 36.5 | 23.7 | 353.8 | 1700.8 | 1564.4 | 4869.7 |
| L2 | 8635.6 | 22051.6 | 16777.1 | 1.5 | 5527.4 | 1572.2 | 3014.2 | 2339.4 | 952.9 | 60871.8 |
| L3 | 0.5 | 363.5 | 17328.9 | 2596.2 | 67.4 | 34.3 | 2426.5 | 5156.1 | 2023.6 | 29996.9 |
| L4 | 42.8 | 10.0 | 171.0 | 2955.0 | 729.6 | 12.0 | 504.5 | 3439.6 | 1061.8 | 8926.4 |
| L4A | 8255.8 | 10062.2 | 8324.9 | 2864.3 | 2178.6 | 2395.2 | 1246.2 | 8181.6 | 3939.5 | 47448.3 |
| L5 | 6855.2 | 8213.9 | 5263.3 | 1564.3 | 1224.3 | 1465.1 | 562.8 | 1503.2 | 1330.1 | 27982.2 |
| L6 | 2188.1 | 21576.4 | 18289.1 | 793.6 | 1430.2 | 7.1 | 2020.9 | 5859.9 | 2264.8 | 54430.1 |
| L7 | 33.3 | 193.2 | 189.8 | 2911.1 | 87.0 | 45.1 | 1454.2 | 4081.0 | 1598.0 | 10592.7 |
| M2 | 32.3 | 262.4 | 589.6 | 1465.8 | 36.9 | 20.6 | 1189.3 | 5852.3 | 2087.6 | 11536.8 |
| L8 | 3.0 | 157.1 | 107.6 | 1305.9 | 58.0 | 16.8 | 986.9 | 4751.4 | 1396.1 | 8782.7 |
| MW | 7978.5 | 19828.0 | 14565.0 | 163.1 | 6204.9 | 4830.5 | 2564.5 | 6639.1 | 2538.9 | 65312.4 |
| Sum | 34103.8 | 82893.6 | 81672.2 | 17491.0 | 17580.9 | 10422.6 | 16323.8 | 49504.3 | 20757.8 | 330750 |

*DOI:* 10.22055/jise.2023.43268.2061

**جدول ۲- سطح زیر کشت محصولات بر حسب هکتار (سازمان جهاد کشاورزی قزوین)**

**Table 2- Crop area in hectares (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin)**

| Beneficiary / Crop | L1 | L2 | L3 | L4 | L4A | L5 | L6 | L7 | M2 | L8 | MW |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat | 1972 | 2681 | 6296 | 1228 | 1151 | 1017 | 3671 | 2054 | 1174 | 3724 | 2111 |
| Forage corn | 296 | 20 | 295 | 104 | 25 | 36.7 | 73.5 | 0 | 0 | 88.5 | 20 |
| Tomato | 309 | 330.2 | 420 | 131.5 | 65.5 | 77.5 | 169.8 | 429.9 | 198 | 278.5 | 164 |
| Alfalfa | 406 | 496 | 859 | 278 | 136 | 149 | 395 | 192 | 116 | 967 | 517 |
| Barley | 67 | 136 | 775 | 190 | 188 | 72 | 682 | 327 | 263 | 974 | 505 |
| Sugar beet | 10 | 9.5 | 609 | 0 | 125 | 0 | 423 | 27.5 | 0 | 176 | 101 |
| Potato | 0 | 0 | 16 | 5 | 0 | 2 | 2 | 39.8 | 41.5 | 17 | 16 |
| Maize | 0 | 5.6 | 171 | 5 | 80 | 1.5 | 103 | 35 | 0 | 0 | 0 |
| Sum | 3060 | 3678.3 | 9441 | 1941.5 | 1770.5 | 1355.7 | 5519.3 | 3105.2 | 1792.5 | 6225 | 3434 |

**جدول ۳- هزینه عملیات کشاورزی، عملکرد متوسط و قیمت فروش محصولات زراعی در شبکه آبیاری دشت قزوین در سال ۱۳۹۸ (سازمان جهاد کشاورزی قزوین و درگاه ملی آمار)**

**Table 3- The cost of agricultural operations, Average production potential and the sale price of crops in the Qazvin plain irrigation network in 2018 (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin and Statistics Center of Iran)**

| Crop name | Cost of agricultural operations (Rials/ha) | Average production potential (ton/ha) | Average cost of agricultural operations per kilogram (Rials) | Sales price (Rial) |
|---|---|---|---|---|
| Wheat | 55479768 | 5 | 11000.9 | 17094 |
| Forage corn | 46333758 | 58 | 798.9 | 3150.3 |
| Tomato | 138296418 | 75 | 1844.0 | 7040.4 |
| Alfalfa | 46933188 | 11.8 | 3977.4 | 16480 |
| Barley | 47284854 | 3.7 | 10507.7 | 19783.8 |
| Sugar beet | 112795488 | 52 | 2169.1 | 5217.3 |
| Potato | 149063720 | 27 | 5520.1 | 23689.4 |
| Maize | 53014914 | 9.9 | 5355.0 | 17816.9 |

**محاسبه قیمت تمام شده آب**

هزینه تمام شده آب از دو رهیافت کلی شامل رهیافت حسابداری و رهیافت اقتصاد مهندسی قابل محاسبه است. در رهیافت حسابداری، از فنون حسابداری صنعتی استفاده می‌شود. استهلاک سالانه دارایی‌ها به عنوان هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه با هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری انجام شده جمع شده و حاصل بر مقدار محصول (آب) تقسیم می‌شود. در رهیافت اقتصاد مهندسی کلیه‌ی هزینه‌های سرمایه‌ای، بهره‌برداری و نگهداری تأسیسات و سایر هزینه‌ها در کل دوره عمر طرح محاسبه شده و با تشکیل جدول گردش نقدی هزینه‌ها، هزینه تمام شده آب محاسبه می‌شود. مهم‌ترین اختلاف دو رهیافت مذکور در ارزش زمانی پول است. در رهیافت حسابداری ارزش زمانی پول در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود (Tahamipour zarandi and Yazdani, 2016). به‌منظور محاسبه ارزش زمانی پول در این پژوهش از رهیافت اقتصاد مهندسی برای برآورد قیمت تمام شده آب استفاده شده است. هزینه‌های سالانه شرکت آب منطقه‌ای که شامل هزینه مرمت شبکه و حقوق کارشناسان مرتبط، هزینه‌های سالانه شرکت بهره‌برداری شبکه آبیاری دشت قزوین شامل هزینه مرمت جزئی شبکه، حقوق میراب‌ها، حقوق کارشناسان و هزینه دفاتر فروش آب و هزینه سالانه جهاد کشاورزی شامل هزینه مرتبط با بازنگری طرح‌های کشت و صدور طرح‌های کشت جدید و هزینه مرتبط به کارشناسان است. هزینه‌های سالانه شرکت آب منطقه‌ای، شرکت بهره‌برداری از شبکه آبیاری دشت قزوین و هزینه سالانه جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۸ و هزینه‌های سرمایه‌ای پروژه آبیاری احداث سد طالقان که مربوط به سال ۱۳۵۷ است که به‌ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) ارائه شده است.

با استفاده از اطلاعات جدول‌های (۴) و (۵) برای برآورد قیمت هر متر مکعب آب از روابط (۱) تا (۳) استفاده شد. سال ۱۳۹۸ به‌عنوان سال مبنا برای محاسبات اقتصادی انتخاب شد. با توجه به اینکه هزینه‌های ساخت شبکه مربوط به سال ۱۳۵۷ است؛ بنابراین با استفاده از رابطه (۱) به سال ۱۳۹۸ بازگردانده شد.

$$C = (1+i)^N \times F \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، C: هزینه‌های ساخت شبکه آبیاری دشت قزوین به قیمت سال مورد مطالعه (ریال)، F: هزینه اولیه ساخت به قیمت سال ۱۳۵۷ (ریال)، N: فاصله زمانی بین ساخت شبکه و زمان مطالعه و i: نرخ بهره که در این مطالعه ۱۸درصد معادل نرخ سود بلند مدت بانک‌ها (Central Bank of the Islamic Republic of Iran) در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از روابط (۲) و (۳) قیمت هر متر مکعب آب برآورد شد.

$$P = \frac{C \times A + M}{V} \qquad (۲)$$

$$A = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \qquad (۳)$$

در روابط (۲) و (۳)، P: قیمت هر متر مکعب آب (ریال)، M: هزینه بهره‌برداری و نگهداری (ریال)، V: حجم آب تأمین شده (متر مکعب)، A: عامل بازیافت سرمایه برای محاسبه معادل یکنواخت سالانه هزینه‌ها و n: عمر مفید پروژه است که برای شبکه آبیاری دشت قزوین در این پژوهش ۵۰ سال در نظر گرفته شده است (Mansouri and Ghiasi, 2002).

**تابع عملکرد**

برای برآورد مقدار محصول تولیدشده بر اساس مقدار آب مصرفی، از رابطه آب_تولید ارائه شده توسط Rao et al. (1988) استفاده شده است. بر اساس رابطه (۴)، تابع عملکرد محصولات زراعی در دوره‌های مختلف رشد رابطه خطی با میزان آب مصرفی دارد.

$$\frac{Ya}{Ym} = \prod_{i=1}^{n} [1 - Ky_i(1 - \frac{AET_i}{PET_i})] \qquad (۴)$$

که در آن، Ya: عملکرد واقعی بر حسب تن بر هکتار، Ym: عملکرد پتانسیل بر حسب تن بر هکتار، $Ky_i$: ضریب حساسیت محصول نسبت به کم‌آبی در دوره رشد i ام، $AET_i$: مقدار آب داده شده به گیاه (تبخیر تعرق واقعی) در دوره رشد i ام بر حسب مترمکعب، $PET_i$: نیاز آبی گیاه (تبخیر تعرق پتانسیل) در دوره رشد i ام بر حسب مترمکعب و n: تعداد دوره‌های رشد برای هر گیاه است. عملکرد پتانسیل مطابق جدول (۶) است.

هر گیاه را باید به اندازه‌ای آبیاری نمود (نیاز آبیاری) که تبخیر و تعرق گیاه (نیاز آبی) تأمین شود. این نیاز آبیاری، علاوه بر تبخیر تعرق از بارش مؤثر نیز اثر می‌پذیرد؛ زیرا بخشی از نیاز آبی (تبخیر تعرق) می‌تواند با بارش تأمین گردد. نیاز آبی گیاه (PET) با استفاده از روابط (۵) تا (۷) برآورد شد.

$$dn = ET - P_e \qquad (۵)$$

$$ET = dn + P_e \qquad (۶)$$

$$PET_i = ET \times A \qquad (۷)$$

*DOI:* 10.22055/jise.2023.43268.2061

در رابطه (۵) و (۶)، ET: تبخیر و تعرق (میلی‌متر بر ماه)، dn: عمق خالص آبیاری (میلی‌متر بر ماه) و $P_e$: بارش مؤثر (میلی‌متر بر ماه) است که با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات برای محصولات زراعی دشت قزوین به ترتیب مطابق جدول‌های (۷) و (۸) برآورد شده است. در رابطه (۷) منظور از A سطح زیر کشت محصول است.

**جدول ٤- هزینه سالانه بر اساس سال ۱۳۹۸ (شرکت آب منطقه‌ای قزوین و سازمان جهاد کشاورزی قزوین)**
**Table 4- Annual expenses based on 2018 (Qazvin Regional Water Company and Organization of Agricultural- Jihad Qazvin)**

| Cost items | Amount (million Rials) |
|---|---|
| Annual expenses of the regional water company | 12750 |
| Annual expenses of Qazvin plain irrigation network exploitation company | 40000 |
| Annual expenses of the Agricultural Jihad Organization | 1740 |

**جدول ٥- هزینه‌های سرمایه‌ای پروژه آبیاری طالقان بر اساس قیمت‌های سال ۱۳۵۷ (شرکت آب منطقه‌ای قزوین)**
**Table 5- Capital costs of Taleghan irrigation project based on the prices of 1978 (Qazvin Regional Water Company)**

| Cost items | Amount (million Rials) |
|---|---|
| Costs of Taleghan dam, diversion dams, tunnels and overflows | 824.76 |
| The cost of irrigation network channels | 10316.4 |
| Dam tank cost | 150 |
| Interest related to the cost of the building during construction (10% of the cost of the building) | 680.92 |

**جدول ٦- پتانسیل تولید محصولات زراعی شبکه آبیاری دشت قزوین بر حسب تن بر هکتار (سازمان جهاد کشاورزی قزوین)**
**Table 6- Crop production potential of Qazvin plain irrigation network in tons per hectare (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin)**

| Crop name | Wheat | Forage corn | Tomato | Alfalfa | Barley | Sugar beet | Potato | Maize |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Yield potential | 7 | 80 | 120 | 15 | 4.5 | 100 | 45 | 13 |

**جدول ۷- عمق خالص آبیاری بر حسب میلی‌متر بر ماه (سازمان جهاد کشاورزی قزوین)**
**Table 7- Net depth of irrigation in millimeters per month (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin)**

| Month / Crop name | Far. | Ord. | Kho. | Tir | Mor. | Sha. | Meh. | Aba. | Aza. | Dey | Bah. | Esf. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat | 92 | 107 | 52 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| Forage corn | 0 | 8 | 85 | 222 | 233 | 136 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tomato | 16 | 42 | 196 | 245 | 212 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Alfalfa | 58 | 75 | 142 | 161 | 155 | 128 | 80 | 23 | 2 | 0 | 0 | 12 |
| Barley | 92 | 89 | 18 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| Sugar beet | 13 | 44 | 196 | 243 | 226 | 126 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Potato | 16 | 23 | 193 | 234 | 203 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maize | 0 | 17 | 167 | 230 | 190 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**جدول ۸- بارش مؤثر بر حسب میلی‌متر بر ماه**

**Table 8- Effective precipitation in millimeters per month**

| Month / Crop name | Far. | Ord. | Kho. | Tir | Mor. | Sha. | Meh. | Aba. | Aza. | Dey | Bah. | Esf. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat | 23 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 13 | 8 | 19 | 29 |
| Forage corn | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tomato | 12 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Alfalfa | 22 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 20 | 15 | 22 | 29 |
| Barley | 23 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 13 | 8 | 19 | 29 |
| Sugar beet | 1 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Potato | 12 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maize | 0 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

مقدار آب داده شده به هر گیاه (AET) با توجه به حجم آب تخصیص یافته به هر بهره‌بردار، نسبت نیاز آبی گیاهان کشت شده و راندمان آبیاری با استفاده از رابطه (۸) برآورد شده است.

$$AET = demand \times V_{Ig} \times E + P_e \times A \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، demand: نسبت نیاز آبی گیاه کشت شده در هر بهره‌بردار بر حسب درصد، $V_{Ig}$: حجم آب تخصیص یافته به هر بهره‌بردار بر حسب مترمکعب بر ماه و E: راندمان کل در شبکه آبیاری دشت قزوین است که طبق اعلام مرکز تحقیقات کشاورزی استان قزوین (بر اساس حاصل‌ضرب راندمان کاربرد، انتقال و توزیع) ۴۵ درصد است (Mazandarani Zadeh and Hoseini, 2023).

**بهره‌وری**

نوع و تعداد شاخص‌های بهره‌وری با توجه به دیدگاه‌های مختلف متفاوت است(Asadi et al., 2022). در تحقیق حاضر متناسب با هدف اصلی از شاخص مالی بهره‌وری آب استفاده گردید. شاخص مذکور عبارت است از نسبت سود خالص به ازای واحد حجم آب (Net Benefit Per Drop).

$$NPBD = \frac{\text{سود خالص}}{\text{مقدار آب مصرف شده}} \qquad (۹)$$

**مدل‌های بهینه‌سازی**

**الف- بهینه‌سازی الگوی کشت**

در این مدل با فرض اینکه الگوی توزیع آب مطابق وضعیت فعلی است جدول (۱) و هر متر مکعب آب به قیمت واقعی عرضه می‌گردد، اقدام به بهینه‌سازی الگوی کشت شده است. این مدل شامل ۹۹ متغیر (سطح زیر کشت نه محصول شامل گندم، ذرت‌علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی، یونجه، جو، چغندرقند، سیب‌زمینی، ذرت دانه‌ای و آیش در ۱۱ بهره‌بردار) است. تابع هدف و قیدهای آن مطابق روابط (۱۰) تا (۱۴) است.

$$MAXP_t = \sum_{i=1}^{11}\sum_{j=1}^{9} Ya_{i,j} \times A_{i,j} \times (P_{sj} - P_{cj}) \qquad (۱۰)$$

$$P_{cj} = P_{CA} + P_W \qquad (۱۱)$$

$$P_W = P_{WA} \times \sum_{m=1}^{12} V_W \qquad (۱۲)$$

$$P_{CA} = P_{AVG} \times Y_i \times A_i \qquad (۱۳)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{11}\sum_{j=1}^{9} A_{ij} \le \sum_{j=1}^{m} A_i \qquad (۱۴)$$

در روابط بالا، $Ya_{ij}$: عملکرد واقعی محصول j ام در بهره‌بردار i برحسب تن بر هکتار، $A_{ij}$: سطح زیر کشت محصول j ام در بهره‌بردار i برحسب هکتار، $P_{sj}$: قیمت فروش محصول j ام بر حسب ریال، $P_{cj}$: هزینه تولید محصول j ام برحسب ریال، $P_{CA}$: هزینه عملیات کشاورزی بر حسب ریال، $P_W$ هزینه آب بر حسب ریال، $P_{WA}$: هزینه هر متر مکعب آب بر حسب ریال، $V_W$: حجم آب مصرفی، $P_{AVG}$: متوسط هزینه عملیات کشاورزی هر کیلوگرم بر حسب ریال، $P_t$: درآمد شبکه، $A_i$: سطح زیر کشت هر بهره‌بردار برحسب هکتار و $A_{ij}$: سطح زیر کشت محصول j در بهره‌بردار i بر حسب هکتار است که مجموع سطح زیر کشت محصولات در هر بهره‌بردار نباید از سطح زیر کشت آن بهره‌بردار بیشتر شود.

**ب- بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب**

در این مدل به بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب به‌منظور حداکثر سازی درآمد کشاورزان در صورت عرضه هر متر مکعب آب به قیمت واقعی پرداخته شده است. در واقع در این مدل الگوی توزیع آب ماهانه تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین و سطح زیر کشت محصولات در هر بهره‌بردار به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که درآمد کشاورزان حداکثر گردد. این مدل دارای

*DOI:* 10.22055/jise.2023.43268.2061

۲۳۱ متغیر است که ۹۹ متغیر مربوط به بهینه‌سازی سطح زیر کشت نه محصول در ۱۱ بهره‌بردار و ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی توزیع آب میان ۱۱ بهره‌بردار در ۱۲ ماه است. تابع هدف و قیدهای آن همانند روابط (۱۵) تا (۲۰) است. در این مدل علاوه بر قیدهای مدل قبل، قید مقدار آب تخصیص یافته ماهانه اضافه شده است. مجموع آب ماهانه توزیع شده در شبکه نباید از مقدار تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین بیشتر باشد.

$$MAXP_t = \sum_{i=1}^{11}\sum_{j=1}^{9} Y_{i,j} \times A_{i,j} \times (P_{sj} - P_{cj}) \qquad (۱۵)$$

$$P_{cj} = P_{CA} + P_W \qquad (۱۶)$$

$$P_W = P_{WA} \times \sum_{m=1}^{12} V_W \qquad (۱۷)$$

$$P_{CA} = P_{AVG} \times Y_i \times A_i \qquad (۱۸)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} A_{ij} \le \sum_{j=1}^{m} A_i \qquad (۱۹)$$

$$\forall i = \sum_{i=1}^{n} V_{it} \le V_i \quad 1,2,\dots,11 \;\; and \;\; \forall t = 1,2,\dots,12 \qquad (۲۰)$$

در رابطه (۲۰)، $V_{it}$: مجموع آب توزیع شده میان بهره‌برداران (i=1,2,…,11) در هر ماه (m=1,2,…,12) است که نباید بیشتر از حجم آب تخصیص یافته به شبکه در ماه باشد.

**الگوریتم ژنتیک**

الگوریتم ژنتیک عبارت از یک جستجوی چندجانبه موازی و هدایت‌شده بر اساس نظریه تکامل است که با شبیه‌سازی فرآیندهای بقای عضو برتر در علم زیست‌شناسی، اقدام به یافتن بهترین پاسخ یک مسئله می‌نماید. عملگرهای الگوریتم ژنتیک شامل انتخاب، پیوند و جهش است که به‌ترتیب از آن‌ها استفاده می‌شود تا نسل بعد به وجود آید. عملگر انتخاب، کروموزوم‌های قوی‌تر را به نسل‌های بعدی انتقال می‌دهد. عملگرهای پیوند و جهش با ترکیب و تغییر کروموزوم‌ها به تولید کروموزوم‌های جدید و جستجو در فضای مسئله برای رسیدن به جواب‌های بهتر کمک می‌کند (Hoseini et al., 2021).

درصد تقاطع و جهش در مدل‌های بهینه‌سازی به‌ترتیب هشت دهم و یک دهم، تعداد اعضای هر نسل برابر ۱۰۰ و میزان تکرار برابر ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است (Taher et al., 2011; Hoseini et al., 2021). شایان ذکر است الگوریتم در محیط نرم‌افزار Matlab 2015 در رایانه Intel Core i5 @2.5GHz با حافظه داخلی ۶ گیگابایت با زمان متوسط اجرای ۱۷۵۰ ثانیه اجرا شد.

**داده‌ها**

اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش شامل الگوی کشت، عمق خالص آبیاری، عملکرد پتانسیل، ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی و هزینه عملیات کشاورزی از سازمان جهاد کشاورزی و الگوی توزیع آب، آب بهاء، هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از شبکه آبیاری دشت قزوین از شرکت آب منطقه‌ای، نرخ سود سپرده بلند مدت از بانک مرکزی و قیمت فروش محصولات از مرکز آمار برای سال ۱۳۹۸ جمع‌آوری شدند.

## نتایج و بحث

قیمت هر متر مکعب آب با استفاده از روابط اقتصاد مهندسی ۸۵۹۵ ریال برآورد شد. در جدول (۹) به مقایسه درآمد بهره‌برداران پرداخته شده است. مطابق این جدول در وضعیت فعلی (عرضه آب به قیمت ۹۴۰ ریال) درآمد شبکه آبیاری دشت قزوین حدود ۸۹ میلیارد تومان است که در صورت عرضه هر متر مکعب آب به قیمت ۸۵۹۵ ریال، الگوی فعلی کشت و توزیع آب نه تنها منجر به کسب درآمد برای کشاورزان نمی‌گردد؛ بلکه باعث تضرر آن‌ها نیز می‌شود. درحالی‌که با بهینه‌سازی الگوی کشت، درآمد شبکه آبیاری دشت قزوین به حدود ۱۰۱ میلیارد تومان و با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب تقریبا به ۲۳۳ میلیارد تومان می‌رسد. در واقع با بهینه‌سازی علی‌رغم افزایش حدود نه برابری قیمت آب علاوه بر این که می‌توان درآمد شبکه را به ترتیب حدود ۱۳ و ۱۴۴ میلیارد تومان نسبت به وضعیت فعلی افزایش داد، عرضه آب به قیمت هزینه‌های تمام شده سبب می‌شود که دولت تمام هزینه‌های اعمال شده را کسب نماید.

بررسی میزان NPBD در جدول (۱۰) نشان می‌دهد میزان بهره‌وری مالی از آب با بهینه‌سازی الگوی کشت در L1، L3، L4، L7، M2 و L8 به‌ترتیب پنج، یک و پنج دهم، چهار، چهار، چهار و چهار دهم و سه و هفت دهم برابر و با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب در بهره‌بردارهای L1، L4، L5، M2 و L8 به‌ترتیب سه و شش دهم، ۹۵/۳، ۱۰/۸، ۳۳/۰ و ۱۰/۶ برابر وضعیت فعلی می‌شود. در حالی‌که در صورت عرضه هر متر مکعب آب به قیمت ۸۵۹۵ ریال و عدم تغییر الگوی کشت و توزیع آب مقدار متوسط NPBD نسبت به وضعیت فعلی ۲۸۹/۴ درصد کاهش می‌یابد در صورتی که با بهینه‌سازی الگوی کشت به طور متوسط ۴۰ درصد و با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب به طور متوسط ۳۸۹/۶ درصد نسبت به وضعیت فعلی که هر متر مکعب آب ۹۴۰ ریال عرضه می‌گردد افزایش می‌یابد. در جدول (۱۱)، الگوی کشت بهینه شده در مدل بهینه‌سازی الگوی

کشت و در جدول‌های (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب الگوی کشت و الگوی توزیع آب بهینه شده در مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب نشان داده شده است. مقایسه الگوی کشت بهینه شده در مدل بهینه‌سازی الگوی کشت جدول (۱۱) با وضعیت فعلی جدول (۲) نشان می‌دهد سطح زیر کشت حدود ۶۰ هکتار کاهش و سطح زیر کشت تمامی محصولات به جز چغندرقند کاهش یافته است. در واقع خروجی‌های مدل بهینه‌سازی الگوی کشت نشان می‌دهد اقتصادی‌ترین محصول برای کشت در شبکه آبیاری دشت قزوین در صورت عدم تغییر الگوی فعلی توزیع آب و عرضه هر متر مکعب آب به قیمت ۸۵۹۵ ریال چغندرقند و پس از آن به ترتیب گندم، ذرت‌علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی، آیش، جو، سیب زمینی، یونجه و ذرت دانه‌ای است. بررسی الگوی کشت بهینه شده در مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب جدول (۱۲) نشان می‌دهد در صورت عرضه هر متر مکعب آب به قیمت ۸۵۹۵ ریال، سطح زیر کشت شبکه آبیاری دشت قزوین حدود ۸۸۶ هکتار نسبت به وضعیت فعلی کاهش می‌یابد و در الگوی کشت پیشنهادی مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب سطح زیر کشت گندم، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی، یونجه، جو و ذرت دانه‌ای به ترتیب ۹۷، ۹۹، ۸۷، ۱۰۰، ۹۷ و ۹۵ درصد کاهش و سطح زیر کشت چغندرقند و سیب‌زمینی به‌ترتیب ۲۳۳۹ و ۲۰۷۶ درصد افزایش یافته است. با بررسی و مقایسه الگوی کشت فعلی جدول (۲) و بهینه شده در مدل‌های بهینه‌سازی جدول‌های (۱۱ و ۱۲) و مقدار تولید محصولات در شکل (۲) می‌توان دریافت با افزایش قیمت آب و کاهش سود ناخالص مدل تمایل به افزایش سطح زیر کشت محصولاتی دارد که عملکرد بیشتر و حساسیت کمتری به تنش آبی دارند و بر این اساس مناسب‌ترین محصولات برای کشت در شبکه آبیاری دشت قزوین بر اساس خروجی مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب به ترتیب چغندرقند، سیب‌زمینی، آیش، گندم، گوجه-فرنگی، جو، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای و یونجه هستند. اگرچه محصولات دیگر شامل گندم و جو حساسیت پایینی در برابر تنش آبی دارند ولی به دلیل عملکرد پایین و به دنبال آن کاهش درآمد شبکه آبیاری، مدل تمایل به افزایش سطح زیر کشت آن‌ها ندارد.

**جدول ۹- درآمد بهره‌برداران شبکه آبیاری دشت قزوین (میلیارد تومان)**

**Table 9- Income of operators of Qazvin plain irrigation network (billion Tomans)**

| Beneficiary | Current status (Price per cubic meter of water 940 Rials) | Current status (Price per cubic meter of water 8595 Rials) | Optimal cultivation pattern | Optimal water allocation and cultivation pattern |
|---|---|---|---|---|
| L1 | 1.5 | -2.2 | 7.5 | 2.3 |
| L2 | 9.9 | -36.7 | 9.1 | 0.7 |
| L3 | 15.4 | -7.6 | 23.1 | 18.8 |
| L4 | 1.2 | -5.7 | 4.8 | 59.3 |
| L4A | 14.5 | -21.8 | 4.3 | 2.1 |
| L5 | 11.3 | -10.2 | 3.3 | 51.3 |
| L6 | 16.8 | -24.9 | 13.6 | 14.5 |
| L7 | 1.9 | -6.2 | 7.6 | 7.6 |
| M2 | 1 | -7.8 | 4.4 | 58.4 |
| L8 | 4.1 | -2.7 | 15.3 | 14.4 |
| MW | 10.9 | -39.1 | 8.4 | 0.8 |
| Average | 88.5 | -164.9 | 101.3 | 232.5 |

**جدول ۱۰- NPBD بهره‌برداران در شرایط مختلف (ریال بر متر مکعب)**

**Table 10- The amount of NPBD in the current situation and optimization models (Rials per cubic meter)**

| Beneficiary | Current status (Price per cubic meter of water 940 Rials) | Current status (Price per cubic meter of water 8595 Rials) | Optimal cultivation pattern | Optimal water allocation and cultivation pattern |
|---|---|---|---|---|
| L1 | 228.2 | -334.6 | 1140.8 | 812.9 |
| L2 | 1089.5 | -4038.8 | 1001.4 | 316.9 |
| L3 | 3956.5 | -1952.6 | 5934.8 | 3703.4 |
| L4 | 212.9 | -1011.1 | 851.4 | 20287.3 |
| L4A | 1922.3 | -2890.1 | 570.1 | 809.9 |
| L5 | 1371.2 | -1237.7 | 400.4 | 14846.6 |
| L6 | 2583.7 | -3829.4 | 2091.6 | 6784.4 |

*DOI:* 10.22055/jise.2023.43268.2061

| Beneficiary | Current status (Price per cubic meter of water 940 Rials) | Current status (Price per cubic meter of water 8595 Rials) | Optimal cultivation pattern | Optimal water allocation and cultivation pattern |
|---|---|---|---|---|
| L7 | 858.6 | -2801.7 | 3434.3 | 3237.1 |
| M2 | 492.1 | -3838.7 | 2165.4 | 16216.1 |
| L8 | 553.3 | -364.4 | 2064.9 | 5882.4 |
| MW | 1668.9 | -5986.6 | 1286.1 | 234.6 |
| Average | 1357.9 | -2571.4 | 1903.8 | 6648.3 |

**جدول ۱۱- الگوی کشت بهینه در مدل بهینه‌سازی الگوی کشت (هکتار)**

**Table 11- Optimum cultivation pattern in the cultivation pattern optimization model (ha)**

| Beneficiary / Crop | L1 | L2 | L3 | L4 | L4A | L5 | L6 | L7 | M2 | L8 | MW | Sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat | 3.0 | 8.0 | 49.6 | 0.7 | 0.1 | 5.1 | 1.3 | 4.0 | 2.4 | 1.1 | 7.3 | 82.6 |
| Forage corn | 23.2 | 5.8 | 24.2 | 1.6 | 4.1 | 0.5 | 5.6 | 0.1 | 1.6 | 3.5 | 5.0 | 75.2 |
| Tomato | 1.0 | 1.9 | 23.9 | 0.1 | 7.3 | 4.2 | 3.9 | 5.3 | 0.2 | 10.8 | 3.7 | 62.3 |
| Alfalfa | 2.1 | 6.1 | 15.5 | 1.8 | 2.1 | 0.2 | 1.2 | 4.9 | 3.0 | 2.5 | 10.0 | 49.4 |
| Barley | 2.1 | 4.4 | 2.6 | 2.6 | 0.4 | 4.1 | 7.8 | 14.8 | 3.1 | 2.4 | 9.4 | 53.7 |
| Sugar beet | 3019.8 | 3641.1 | 9310.7 | 1921.4 | 1745.9 | 1328.6 | 5469.6 | 3062.7 | 1769.1 | 6190.0 | 3384.8 | 40843.7 |
| Potato | 1.5 | 4.3 | 0.1 | 2.6 | 4.4 | 7.1 | 7.1 | 4.3 | 1.2 | 8.4 | 9.9 | 50.9 |
| Maize | 0.2 | 5.8 | 1.2 | 3.7 | 1.4 | 2.3 | 12.7 | 5.6 | 6.7 | 3.6 | 2.1 | 45.3 |
| Fallow | 7.1 | 0.8 | 13.1 | 7.1 | 4.8 | 3.6 | 10.4 | 3.5 | 5.1 | 2.8 | 1.8 | 60.1 |

**جدول ۱۲- الگوی کشت بهینه در مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب (هکتار)**

**Table 12- Optimum cultivation pattern in the simultaneous optimization model of cultivation pattern and water distribution (ha)**

| Beneficiary / Crop | L1 | L2 | L3 | L4 | L4A | L5 | L6 | L7 | M2 | L8 | MW | Sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wheat | 1.9 | 2.4 | 3.3 | 270.6 | 0.0 | 73.2 | 2.9 | 2.0 | 424.4 | 1.7 | 0.3 | 782.7 |
| Forage corn | 0.1 | 0.7 | 1.5 | 1.4 | 0.0 | 0.7 | 2.0 | 1.9 | 0.0 | 4.3 | 1.4 | 14 |
| Tomato | 0.4 | 0.9 | 1.4 | 0.4 | 0.0 | 5.3 | 4.9 | 2.5 | 308.3 | 4.0 | 0.7 | 328.8 |
| Alfalfa | 1.8 | 3.0 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 1.2 | 0.6 | 0.5 | 1.3 | 2.6 | 11.6 |
| Barley | 2.4 | 1.3 | 1.0 | 42.4 | 0.0 | 68.4 | 3.7 | 2.3 | 1.9 | 1.0 | 0.4 | 124.8 |
| Sugar beet | 3051.3 | 3665.6 | 9422.8 | 0.7 | 1763.9 | 0.1 | 5497.1 | 3093.4 | 0.2 | 6203.7 | 3424.6 | 36123.4 |
| Potato | 1.0 | 0.8 | 2.5 | 1084.5 | 0.0 | 1047.1 | 1.6 | 0.9 | 891.0 | 0.9 | 1.2 | 3031.5 |
| Maize | 0.4 | 1.2 | 6.8 | 0.1 | 0.0 | 0.4 | 3.6 | 0.1 | 0.2 | 7.4 | 0.2 | 20.4 |
| Fallow | 0.7 | 2.5 | 1.3 | 541.2 | 6.6 | 160.5 | 2.3 | 1.5 | 166.0 | 0.8 | 2.5 | 885.9 |

**جدول ۱۳- الگوی توزیع آب در مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب (۱۰۰۰ متر مکعب)**

**Table 13- Water distribution pattern in the simultaneous optimization model of cultivation and water distribution pattern (1000 cubic meters)**

| Month / Beneficiary | Far. | Ord. | Kho. | Tir | Mor. | Sha. | Meh. | Aba. | Aza. | Sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | 5373 | 5345 | 9819 | 17 | 982 | 2163 | 604 | 2476 | 1517 | 28296 |
| L2 | 2492 | 7523 | 636 | 6 | 13 | 0 | 2752 | 5549 | 3295 | 22264 |

*DOI:* 10.22055/jise.2023.43268.2061

| Month / Beneficiary | Far. | Ord. | Kho. | Tir | Mor. | Sha. | Meh. | Aba. | Aza. | Sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L3 | 5083 | 20314 | 15862 | 1 | 116 | 1 | 2230 | 6325 | 908 | 50840 |
| L4 | 2639 | 3177 | 4991 | 5651 | 4906 | 540 | 480 | 4611 | 2222 | 29216 |
| L4A | 2767 | 5191 | 7605 | 3 | 447 | 2161 | 77 | 4646 | 3137 | 26034 |
| L5 | 3785 | 3364 | 4668 | 5482 | 4759 | 520 | 2406 | 9098 | 464 | 34546 |
| L6 | 4295 | 8233 | 4729 | 0 | 70 | 1 | 208 | 2961 | 852 | 21349 |
| L7 | 960 | 5162 | 12027 | 2 | 56 | 2163 | 383 | 149 | 2493 | 23395 |
| M2 | 2635 | 8355 | 5659 | 6316 | 5476 | 712 | 2898 | 1049 | 2930 | 36030 |
| L8 | 2372 | 10087 | 3092 | 3 | 280 | 1 | 2819 | 4316 | 1470 | 24441 |
| MW | 1704 | 6142 | 12585 | 10 | 477 | 2160 | 1468 | 8324 | 1471 | 34339 |
| Sum | 34103.8 | 82893.6 | 81672.2 | 17491.0 | 17580.9 | 10422.6 | 16323.8 | 49504.3 | 20757.8 | 330750 |

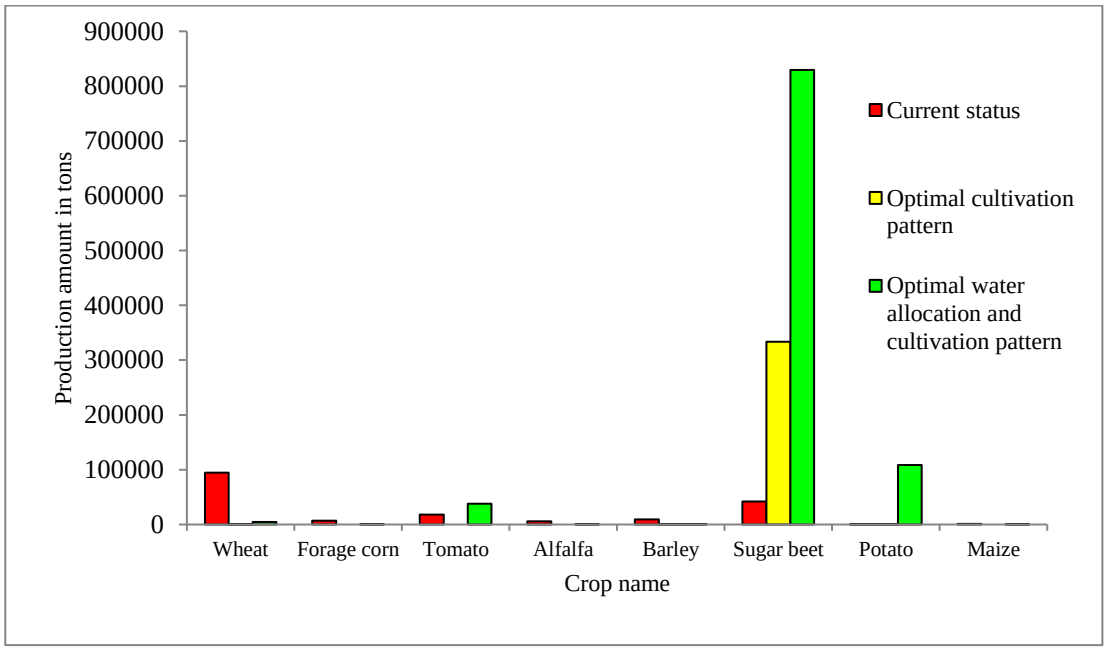



**Fig 2- Comparing the amount of product production in the current situation with optimization models**

**شکل ۲- مقایسه مقدار تولید محصول در وضعیت فعلی با مدل‌های بهینه‌سازی**

## نتیجه‌گیری

قیمت آب از جمله متغیرهای مهم اقتصادی است که در استفاده بهینه از منابع آب در بخش کشاورزی می‌تواند نقش مؤثری داشته باشد. با اعمال سیاست‌گذاری قیمت آب، هزینه نهایی تولید افزایش می‌یابد و انتخاب ترکیب زراعی که به ازاء هر واحد آب منافع بیشتری حاصل نماید ضروری است. در این مطالعه به برآورد هزینه تمام شده هر مترمکعب آب با استفاده از روابط اقتصاد مهندسی و تأثیر آن بر اقتصاد کشاورزان تحت دو مدل بهینه‌سازی الگوی کشت و بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب پرداخته شد. هزینه تمام شده هر متر مکعب آب ۸۵۹۵ ریال برآورد شد و نتایج نشان داد الگوی کشت فعلی در صورت افزایش قیمت آب مناسب نیست و با بهینه‌سازی الگوی کشت و بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب می‌توان به‌ترتیب به درآمدی حدود ۱۴/۷ و ۱۶۲/۷ درصد بیشتر از وضعیت فعلی که قیمت هر مترمکعب آب ۹۴۰ ریال است دست یافت. همچنین نتایج مدل بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب بیانگر تفاوت فاحشی میان سطح زیرکشت محصولات در الگوی کشت بهینه شده با وضعیت فعلی است و سطح زیرکشت چغندرقند و سیب‌زمینی در الگوی کشت بهینه شده به طور چشمگیری افزایش و سطح زیرکشت سایر محصولات کاهش پیدا کرده است و همانطور که نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت توسط Hoseini et al. (2021) در شبکه آبیاری دشت قزوین نشان داده است کشت محصولات دارای خرید تضمینی برای کشاورزان به دلیل عدم وابستگی قیمت محصول به مقدار عرضه شده به بازار بهتر از سایر محصولات است اما کاهش تولید محصولات فاقد خرید تضمینی موجب افزایش قیمت آن‌ها به دلیل کاهش عرضه می‌گردد و منجر به تهدید امنیت غذایی می‌گردد. لذا با توجه به اینکه افزایش قیمت آب بدون توجه به کشاورزان خلاف اقتصاد سالم است و از طرف دیگر به دلیل محدودیت منابع آب استفاده غیر بهینه از آن می‌تواند باعث ایجاد چالش‌های بزرگی در امنیت غذایی شود پیشنهاد می‌گردد در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با در نظر گرفتن رفاه کشاورزان و امنیت غذایی پرداخته شود. همچنین به‌منظور بسترسازی اجتماعی در بین بهره‌برداران لازم است موضوع بحران آب و اهمیت قیمت‌گذاری آب برای آن‌ها به صورت شفاف توضیح داده شود و برگزاری کلاس‌های ترویجی در جهت فرهنگ‌سازی و افزایش آگاهی کشاورزان برای استفاده بهینه از نهاده آب و رعایت الگوی کشت پیشنهادی می‌تواند مؤثر واقع شود.

## تشکر و قدردانی

از شرکت آب منطقه‌ای قزوین و سازمان جهاد کشاورزی که در راستای انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

## References

1- Aidam, P.W., 2015. The impact of water-pricing policy on the demand for water resources by farmers in Ghana. *Agricultural Water Management, 158*, pp.10-16.

2- Asadi, H., Mahmoodi, M. and Zare, S., 2022. Determining Profitability and the Economic Productivity of Agricultural Water in Crop Production. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(6), pp.1404-1411. (In Persian)

3- Badibarzin, H., Hashemi Tabar, M. and Hossini, S.M., 2019. Effect of Pricing and Rationing Strategies of Irrigation Water on Cropping Pattern and Water Demand in Sistan Plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, *33*(3), pp.463-478. (In Persian).

4- Balali, H. and Kasbian Lal, F., 2022. Economic Valuation of Groundwater in Agriculture Sector (Case Study: Hamedan-Bahar Plain). *Journal Of Agricultural Economics and Development*, *36*(1), pp.37-48. (In Persian)

5- Biniaz, A., Ahmadpour Borazjani, M., Ziaee, S. and Mohammadi, H., 2021. Potential Effects of Agricultural Water Pricing and Quota on Productivity and Use of Agricultural Inputs in Kohgiluyeh. *Journal of Water Research in Agriculture*, *35*(1), pp.89-106. (In Persian).

6- Central Bank of the Islamic Republic of Iran. https://www.cbi.ir/.

7- Chu, L. and Grafton, R.Q., 2020. Water pricing and the value-add of irrigation water in Vietnam: Insights from a crop choice model fitted to a national household survey. *Agricultural Water Management*, *228*, p.105881.

8- Ghaderzadeh, H., Shayanmehr, S. and Hezareh, R., 2017. Investigate the effects of pricing policy of water irrigation on cropping pattern and water consumption productivity (Case study: Ghorveh-Dehgolan plain at Kurdistan province). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *11*(4), pp.609-617. (In Persian).

9- Hoseini, M., Mazandaranizadeh, H. and Nazari, B., 2021. Simultaneously Management of Surface and Groundwater Resources and Increasing Farmers' Resilience to Water Scarcity by Predicting the Price of Agricultural Products and using GA (Case Study of Irrigation and Drainage Network of Qazvin Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(2), pp.563-576. (In Persian).

10- Hosseini, S.M. and Mazandarani Zadeh, H., 2021. Optimal Water Allocation among Agricultural Consumers Using Crop Pattern Change Approach to Improve Farmers' Livelihood. *Irrigation Sciences and Engineering*. *Irrigation Sciences and Engineering*, *45*(3), pp.47-61. (In Persian).

11- Kazem Attar, H., Noory, H. and Ebrahimian, H., 2020. Effect of water pricing on persuading farmers to use modern irrigation systems and increasing the economic productivity of irrigation water (Case study: Qazvin Plain Irrigation Network). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *14*(2), pp.616-625. (In Persian).

12- Mansouri, M. and Ghiasi, A., 2002. Estimation of irrigation water cost price at reservoir dams, using engineering economic approach a case study of Bukan, Mahabad and Barun reservoirs. *Journal Agricultural Economics and Development, 10*(37), 171-192. (In Persian).

13- Mazandarani Zadeh, H. and Hoseini, M., 2023. Investigating the effect of agricultural product price forecasting on groundwater level using systems dynamics, in order to simultaneously maintain the welfare of farmers and groundwater resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 53*(11), 2565-2582. (In Persian).

14- Organization of Agricultural- Jihad Qazvin. https://qazvin.maj.ir/

15- Qu, Y., Kang, J., Lin, X., Ni, H., Jiang, Y. and Chen, G., 2022. Analysis of agriculture water pricing reform in a water-deficit area of Northwest China. *Water Policy*, *24*(10), pp.1570-1589.

16- Rao, N.H., Sarma, P.B.S. and Chander, S., 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, *13*(1), pp.25-32.

17- Regional Water Company of Qazvin. https://www.qzrw.ir/st/273.

18- Sahin, O., Bertone, E., Beal, C. and Stewart, R.A., 2018. Evaluating a novel tiered scarcity adjusted water budget and pricing structure using a holistic systems modelling approach. *Journal of Environmental Management*, *215*, pp.79-90.

19- Shirzadi Laskookalayeh, S., Sabouhi, M., Keikha, A. A. and Davari, K., 2018. Survey of the stability and balance of the aquifer in order to achieve sustainable management (Case Study: Nishabour basin). *Agricultural Economics Research*, *10*(39), pp.187-220. (In Persian)

20- Siasar, H. and Salari, A., 2021. Optimization of Sistan Plain Cropping Pattern Using Multi-Objective Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(5), pp.1006-1017. (In Persian)

21- Statical Center of Iran. https://www.amar.org.ir/.

22- Tahamipour zarandi, M, and Yazdani, S., 2016. The Role of Economic Instruments in IWRM: The Case Study of Irrigation Water Pricing in Western Basins of Iran. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, *47*(3), pp.545-556. (In Persian)

23- Taher, S. A., Shibani, M. R., Nosratabadi, S. M., and Jadidoleslam, M., 2011. A New Approach for Optimal Allocation of DG in Distribution Systems Using GA Method. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, *2*(3), pp.79-90.

24- Zhou, Q., Wu, F. and Zhang, Q., 2015. Is irrigation water price an effective leverage for water management? An empirical study in the middle reaches of the Heihe River basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *89*, pp.25-32.

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 59-75**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

# Determining single and dual crop coefficients and standard evapotranspiration of onion using water balance lysimeter

F. Razzaghi[1*], M. Esmaily[2] and A. R. Sepaskhah [3]

1*- *Corresponding Author*, Associate Professor, Water Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, and Researcher, Drought Research Center, Shiraz University, Shiraz, Iran *(razzaghi@shirazu.ac.ir)*.
2- MSc. Student, Water Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
3- Professor, Water Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, and Researcher, Drought Research Center, Shiraz University, Shiraz, Iran.

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 21 November 2023
Revised: 14 July 2024
Accepted: 17 July 2024

*Keywords:*
Bulb nitrogen concentration, Green canopy temperature, Leaf area index, Water productivity.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Razzaghi, F., Esmaily, M., Sepaskhah, A. R. (2025). 'Determining single and dual crop coefficients and standard evapotranspiration of onion using water balance lysimeter', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 59-75. doi: 10.22055/jise.2024.45245.2099.

## Introduction

Water shortage is an important obstacle limiting crop production in arid and semi-arid climate such as Iran (Sepaskhah et al., 2006). One of the best solutions to reduce the consumption of irrigation water in agricultural sector is to determine crop evapotranspiration (Gheysari et al., 2006) specially by lysimeters to calculate accurate crop water demand (Razzaghi and Sepaskhah, 2010).

Onion is one of the most important edible vegetables and its annual production in Iran is 2566 thousand tons (Ministry of Agriculture-Jahad, 2021). Onions demand high water requirements and if they face water shortage in the initial stage of growth, their yield is significantly reduced. Considering the problems of water shortage due to excessive consumption and the subsequent increase in the water demand and the need to accurately determine the water requirement of onions, this research aims to determine the single ($K_c$) and dual crop coefficients ($K_e$ and $K_{cb}$), and direct estimation of the standard crop evapotranspiration rate of the onion in three water balance lysimeters. The reference evapotranspiration was calculated using data from a meteorological station and the modified FAO Penman-Monteith equation. The onion standard crop evapotranspiration $ET_c$ was determined using the irrigation water balance lysimeter and equation, and thereafter, the single crop coefficients at different growth stages were calculated. Due to the presence of a micro-lysimeter, the amount of evaporation coefficient ($K_e$) and transpiration coefficient ($K_{cb}$) in different growth stages were also calculated. The mean values of the single crop coefficient in the initial, mid, and end growth stages were 0.50, 1.04, and 0.7, respectively. The $K_e$ coefficient in the initial, mid, and final growth stages were 0.42, 0.26, and 0.47, respectively. The $K_{cb}$ in the initial, mid, and end growth stages were 0.08, 0.78, and 0.22, respectively.

## Methodology

This research was carried out from the middle of May to the end of October 2019 in three water balance lysimeters of the School of Agriculture, Shiraz University. Meteorological data was taken from a meteorological station that is only 10 meters away from the lysimeters. Onion seeds were sown at a depth of 3 cm in 4 rows per lysimeter and the distance between the rows was 25 cm and the distance

between the plants on the row was 15 cm. The area around the lysimeters was cultivated with the same onion seeds to minimize the oasis effect on the lysimeters. At the beginning of cultivation, 100 kg of diammonium phosphate fertilizer was given to each lysimeter. Also, during the growing season, 200 kg/ha of urea fertilizer containing 46% nitrogen (equivalent to 92 kg nitrogen) was equally applied to the soil inside the lysimeters in two stages (94 and 117 days after sowing).

Standard onion evapotranspiration ($ET_C$) was determined using the water balance method. Evaporation from the soil surface (E) was measured by micro-lysimeters with 30 cm height and 9 cm diameter. The amount of transpiration (T) was calculated from the difference between $ET_C$ and E. The amount of reference evapotranspiration ($ET_o$) was calculated using modified Pentman-Mantieth-FAO equation by Razzaghi and Sepaskhah (2012). The single (Kc) and dual ($K_e$ and $K_{cb}$) crop coefficients were calculated using ETc, T, E, and $ET_o$. In addition, the amount of direct standard crop evapotranspiration of onions was calculated using the Penman-FAO equation. Also, the onion yield, onion bulb nitrogen concentration, and water productivity were determined at harvest.

**Results and Discusspn**

In this study, the length of initial, development, mid and end stages of onion was determined as 56, 64, 25, and 21 days, respectively. The value of ETc , T, and E were 651.2 mm, 296 mm, and 355.2 mm, respectively. Also, the results showed that there was a significant difference between $ET_0$ and $ET_c$ (about 3 mm/ days) from sowing to about 50 days after sowing , which was caused by the slow growth of onions at the beginning of the growing season (Fig. 1). The value of $ET_c$ equal to 2.29 mm/day on the first day of sowing showed the value of evaporation from the soil surface (Fig. 1). The initial, mid, and end $K_c$ were 0.50, 1.04, and 0.7, respectively. In a research carried out in Spain, the onion initial, mid, and end $K_c$ were 0.65, 1.20, and 0.75, respectively (López-Urrea et al., 2009). Moreover, the average values of $K_e$ in the initial, middle, and end stages were obtained as 0.42, 0.26 and 0.47, respectively. The $K_{cb}$ values in the initial, middle, and end stages were 0.08, 0.78, and 0.22, respectively. From the above results, it can be concluded that low $K_{cb}$ in the initial stage was due to the slow growth of the onion and the lack of aerial organs. Also, the slope of the linear regression between the calculated (direct method) and measured (lysimeter) $ET_c$ in the validation stage indicated that the calculated $ET_c$ was 4% lower than the measured values. The correlation coefficient value of 0.85 in the validation stage indicated the acceptable accuracy of the calculated values.

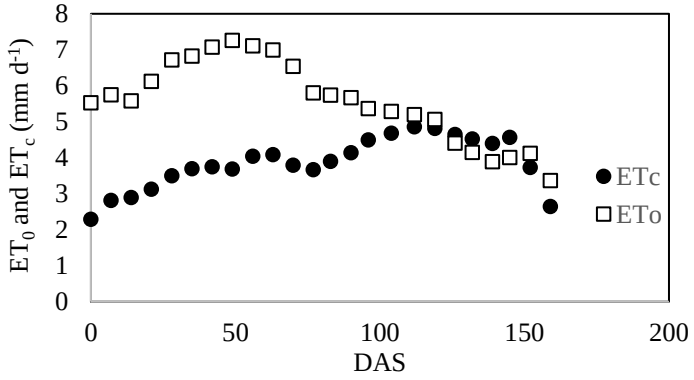



**Fig. 1- The variation of reference evapotranspiration ($ET_0$) and onion standard crop evapotranspiration ($ET_c$) during the growing season (DAS: Days after sowing)**

Also, the average fresh and dry weight of onion bulbs at the end of the growing season was 23.9 and 3.7 tons per hectare, respectively. In another study, the effect of three levels of irrigation and nitrogen fertilizer on the growth and yield of Zargan onion was investigated, and the results showed that the dry weight of single onion bulbs at the level of 100% irrigation and 200 kg of nitrogen fertilizer per hectare (in the form of urea) was equal to 3.58 grams (Roohparvar, 2020). The allowable

concentration of nitrate in onion was declared to be less than 20 mg per 100 g of fresh weight (Lorenze, 1978). According to the measured nitrogen concentration in the bulb (2 %) and the low value of nitrite in the soil, this amount of nitrogen concentration is within the allowable range. Moreover, the irrigation water productivity, and irrigation water productivity per evapotranspiration were equal to 4.9, and 4.1 $kg/m^3$ per hectare, respectively.

## Conclusions

In this research, the value of onion standard evaporationtranspiration was calculated using lysimeter data and water balance method . The values of $ET_c$ , T, and E were 651.2 mm, 296 mm, and 355.2 mm, respectively. The initial, mid and end single crop coefficients were 0.50, 1.04, and 0.7, respectively. Also, the $K_{cb}$ coefficient values were calculated as 0.08, 0.78, and 0.22 in the initial, middle, and end growth stages, respectively . The obtained coefficient can be used by farmers, researchers, designers and consulting engineers to determine the accurate value of onion irrigation water requirement specially in regions facing water shortage such as Iran.

## Acknowledgement

The authors are grateful for the support of Shiraz University, Drought Research Center, and Center of Excellence for On-Farm Water Management.

### References

1- Gheysari, S.M., MirLatifi, M., Homaee, M. and Asadi, M.E., 2006. Determination of crop water use and crop coefficient of corn based on crop growth stages. *Journal of Agricultural Engineering Research, 26*(7), pp:125-142. (In Persian).

2- López-Urrea, R., de Santa Olalla, F.M., Montoro, A. and López-Fuster, P., 2009. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (Allium cepa L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, *96*(6), pp:1031-1036. Doi: 10.1016/j.agwat.2009.02.004.

3- Lorenz, Q. A., 1978. Potential nitrate in edible plants part. (In: D. R. Nielson, J. G. Mac Donald eds.) Nitrogen in the environment, Vol. 2,8. Soil & plant & Nitrogen relationships, Academic Press, New York.

4- Ministry of Agriculture-Jahad. 2021. https://www.maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/Amarnameh-J1-1401.pdf.

5- Razzaghi, F. and Sepaskhah, A.R., 2010). Assessment of nine different equations for $ET_o$ estimation using lysimeter data in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *56*(1), pp:1-12. Doi: 10.1080/03650340902829180.

6- Razzaghi, F. and Sepaskhah, A. R., 2012. Calibration and validation of four common $ET_0$ estimation equations by lysimeter data in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science, 58*(3), pp:303-319. Doi: 10.1080/03650340.2010.518957.

7- Roohparvar, S., 2020. *Effect of Different Levels of Irrigation and Nitrogen Fertilizer on Growth and Yield of Onion (Zargan Cultivar)*. Msc thesis, Shiraz University, Iran.

8- Sepaskhah, A.R., Tavakoli, A.R. and Mousavi S.F., 2006. Principles and Applications of Deficit Irrigation. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (INCID), Tehran., 288 p. (In Persian)

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۷۵-۵۹

# تعیین ضرایب گیاهی یگانه، دوگانه و تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز با استفاده از لایسیمتر بیلان آبی

فاطمه رزاقی[1*]، محمد اسماعیلی[2] و علیرضا سپاسخواه[3]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز و پژوهشگر مرکز مطالعات خشکسالی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (razzaghi@shirazu.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۳- استاد بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز و پژوهشگر مرکز مطالعات خشکسالی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

## چکیده

**برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آب به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، برآورد دقیق تبخیر-تعرق محصولات مختلف کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. یکی از این گیاهان پرمصرف در سبد غذایی خانوار پیاز است که به خاطر آبیاری مکرر، نیاز آبی بالایی داشته و چنانچه در مراحل اولیه رشد دچار کمبود آب گردد، محصول آن به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. لذا این تحقیق با هدف تعیین ضرایب گیاهی یگانه، دوگانه و تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز در سه لایسیمتر بیلان آبی انجام شد. مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی و معادله فائو پنتمن مانتیث اصلاح شده محاسبه شد. میزان تبخیر-تعرق استاندارد پیاز ($ET_c$) با استفاده از معادله بیلان آب خاک تعیین و سپس مقادیر ضرایب گیاهی یگانه در مراحل مختلف رشد محاسبه گردید. با توجه به قرار دادن میکرولایسیمتر در سه لایسیمتر، میزان ضریب تبخیر ($K_e$) و ضرایب تعرق پایه ($K_{cb}$) در مراحل مختلف رشد نیز محاسبه شد. میانگین محصول غده پیاز ۲۴ تن در هکتار بود. مقدار $ET_c$ و تعرق در کل فصل کشت به‌ترتیب برابر ۶۵۱/۲ میلی‌متر و ۲۹۶ میلی‌متر محاسبه شد. طول مراحل اولیه، میانی و نهایی رشد گیاه به‌ترتیب برابر ۵۶، ۲۵ و ۲۱ روز به‌دست آمد. مقدار میانگین ضریب گیاهی یگانه در مرحله اولیه، میانی و نهایی رشد به‌ترتیب ۰/۵۰، ۱/۰۴ و ۰/۷ تعیین شد. مقدار ضریب $K_e$ در مرحله اولیه، میانی و نهایی رشد به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۲۶ و ۰/۴۷ به‌دست آمد. مقدار ضریب $K_{cb}$ در مرحله اولیه، میانی و نهایی رشد به‌ترتیب ۰/۰۸، ۰/۷۸ و ۰/۲۲ تعیین شد. در نهایت با استفاده از ضرایب گیاهی تعیین شده توسط لایسیمتر، می‌توان مقدار دقیق نیاز آبی گیاه پیاز را در مناطقی با اقلیم مشابه و برای مراحل مختلف رشد تعیین نمود.**

**کلید واژه‌ها:** بهره‌وری آب، دمای پوشش سبز، شاخص سطح برگ، غلظت نیتروژن سوخ.

## مقدمه

با توجه به آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک ایران و وجود اراضی با قابلیت کشاورزی زیاد و مصرف قابل‌توجهی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی، کمبود آب مانع مهم محدودکننده تولید است (Sepaskhah et al., 2006). لذا تعیین مقدار دقیق آب آبیاری مورد نیاز گیاهان با استفاده از لایسیمتر حائز اهمیت می‌باشد. داشتن یک برنامه آبیاری صحیح نیازمند داشتن ضرایب گیاهی گیاه مورد نظر در مراحل مختلف رشد و تخمین تبخیر – تعرق آن گیاه می‌باشد (Gheysari et al., 2006). Allen et al. (1998) برای برخی از گیاهان، ضرایب گیاهی آن‌ها را ارائه کردند. اقلیم‌های متفاوت و یکسان نبودن خصوصیات گیاهی موجب اختلاف در مقادیر ضرایب گیاهی و تبخیر-تعرق در مناطق مختلف می‌شود (Allen et al., 2005). برای تخمین نیاز آبی گیاهان یا باید تبخیر – تعرق گیاه مرجع ($ET_o$) را محاسبه کرده و در ضریب گیاهی یگانه گیاه (Kc) مربوطه ضرب کرد و تبخیر – تعرق استاندارد گیاه ($ET_c$) را به‌دست آورد، یا اینکه با استفاده از لایسیمتر که دارای دقت بیشتری می‌باشد، تبخیر – تعرق استاندارد گیاه را به‌دست آورد. روش لایسیمتر به خاطر استفاده از تمام عوامل مؤثر بر نیاز آبی گیاه دارای دقت زیاد می‌باشد (Razzaghi and Sepaskhah, 2010). در بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی انتقال آب و املاح مانند HYDRUS-1D، برای برآورد بهتر نیاز آبی گیاهان از ضریب گیاهی دوگانه (ضریب گیاهی پایه (Kcb) و ضریب تبخیر (Ke)) استفاده می‌شود (Ran et al., 2017). این ضرایب برای گیاهان مختلف در نشریه FAO 56 ارایه شده است (Allen et al., 1998). از آنجایی‌که ضرایب گیاهی یگانه و دوگانه گیاهان در اقلیم‌های مختلف تفاوت دارند، تحقیقات زیادی به‌منظور تعیین این ضرایب از جمله Ding et al (2013)، Zhang et al (2013) و Razmavaran et al (2024) صورت گرفته است لیکن همچنان تحقیقات بیشتری مورد نیاز است تا بتوان این ضرایب را برای کلیه گیاهان مانند پیاز خصوصا در اقلیم نیمه خشک استان فارس تعیین نمود.

با توجه به سودآوری تولید سبزیجات در دنیا، تولید آن‌ها منجر به بهتر شدن اقتصاد کشورها می‌شود (Eigenbrod and Gruda, 2015). پیاز خوراکی (*Allium cepa* L.) جزو سبزیجات متعلق به تیره

سوسنی‌ها (*Alliaceae*) است (Aminpour and Mortazav Bak, 2012). از دیرباز مردم ایران از پیاز به‌عنوان سبزی خوراکی و همچنین در مصارف دارویی استفاده می‌کردند. برخی از محققان خاستگاه اولیه پیاز را ایران و افغانستان می‌دانند. بر اساس آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱ سطح زیر کشت این گیاه در ایران ۵۳/۶ هزار هکتار بوده و با میزان تولید ۲۵۶۶ هزار تن بوده است (Ministry of Agriculture-Jahad, 2021) پیاز منبع پروتئین، کلسیم، آهن، فسفر، سدیم، پتاسیم و ویتامین‌های A، $B_1$، $B_2$ بوده و از لحاظ دارا بودن خواص ضد باکتریایی و تولید کالری دارای اهمیت می‌باشد (Rostam Foroudi, 2006). طبق آمار سازمان خواروبار جهانی در سال ۲۰۱۲ هر خانواده ایرانی به‌طور میانگین در هر سال ۲۲ کیلوگرم پیاز مصرف می‌کند که حدودا دو برابر متوسط مصرف پیاز در دنیا می‌باشد که بیان‌کننده اهمیت آن در سفره مردم ایران است (Karandish et al., 2015).

به‌دلیل نیاز آبی بالای پیاز بخاطر آبیاری مکرر، انجام آبیاری برنامه ریزی شده منجر به افزایش محصول و خواص پیاز می‌گردد (Rostam Foroudi, 2006). در ایران بجز مقدار بسیار محدود در بقیه موارد پیاز به‌صورت کشت آبی انجام می‌شود به‌طوری‌که سهم کشت آبی بیشتر از ۹۹/۷ درصد از سهم پیاز کشت شده را شامل می‌شود و بقیه آن به کشت دیم تخصیص می‌یابد (Ministry of Agriculture-Jahad, 2021 ). با توجه به وجود مشکلات کمبود آب به خاطر مصرف بی رویه و در پی آن افزایش تقاضا برای مصرف آب و نیاز به تعیین دقیق ضریب گیاهی (یگانه و دوگانه) برای تعیین نیاز آبی پیاز، این پژوهش با هدف تعیین ضرایب گیاهی پیاز (رقم توده محلی) در مراحل مختلف رشد در شرایط مزرعه‌ای در لایسیمترهای تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز درمنطقه باجگاه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### شرایط اقلیمی و موقعیت محل

این پژوهش از اواسط اردیبهشت تا اواخر مهر ماه سال ۱۳۹۹در سه لایسیمتر بیلان آبی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، واقع فاصله ۱۶ کیلومتری شمال شرقی شیراز در دشت باجگاه با طول جغرافیایی ′۳۲ °۵۲ و عرض جغرافیایی ′۳۶ °۲۹ و ارتفاع از سطح دریای ۱۸۱۰متر انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه خشک است و متوسط بارندگی آن سالانه ۳۸۶ mm می‌باشد (Ahmadi et al., 2019). داده‌های هواشناسی شامل میانگین دمای هوا، میانگین رطوبت نسبی و درجه روز رشد در طول فصل کاشت از یک ایستگاه هواشناسی که تنها ۱۰ متر از لایسیمترها فاصله دارد، گرفته شده است (شکل ۱). در طول فصل کاشت، حداکثر، حداقل دما به‌ترتیب برابر با ۳۸/۵ و ۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش ۳/۳ میلی‌متر بوده است.

لایسیمترهای مورد آزمایش دارای سطح مقطع دایره‌ای شکل، مساحت ۲ $m^2$ و عمق۱/۶ m تا ۱/۷ m بوده و دارای زهکش می‌باشند (Keykhahmoghadam et al., 2013). برخی از خصوصیات فیزیکی خاک در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول خصوصیات خاک فقط تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری تعیین شده است و احتمالا در اعماق پایین‌تر مشابه ۳۰ سانتی‌متری بالای ان است.

### کشت پیاز

بذر پیاز رقم توده محلی در تاریخ ۱۷ اردیبهشت سال ۱۳۹۹ در چهار خط در هر لایسیمتر و فاصله بین خطوط ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی خط ۱۵ سانتی‌متر و در عمق سه سانتی‌متری کشت شد. زمین دور تا دور لایسیمترها با همان بذر پیاز کشت گردید تا اثر واحه‌ای روی لایسیمترها به حداقل برسد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده روی نمونه خاک، در ابتدای کشت ۱۰۰کیلوگرم کود دی آمونیوم فسفات به عنوان کود ابتدایی قبل از کشت به هر لایسیمتر بصورت جداگانه داده شد. برای جلوگیری از رقابت علف‌های هرز با گیاه پیاز، علف‌های هرز در طول فصل رشد چندین دفعه به‌صورت دستی حذف شدند. همچنین در طول فصل رشد، ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود اوره حاوی ۴۶ درصد نیتروژن (معادل ۹۲ کیلوگرم نیتروژن) به طور مساوی و در دو مرحله زمانی (۹۴ و ۱۱۷ روز بعد از کاشت) به خاک داخل لایسیمترها داده شد.

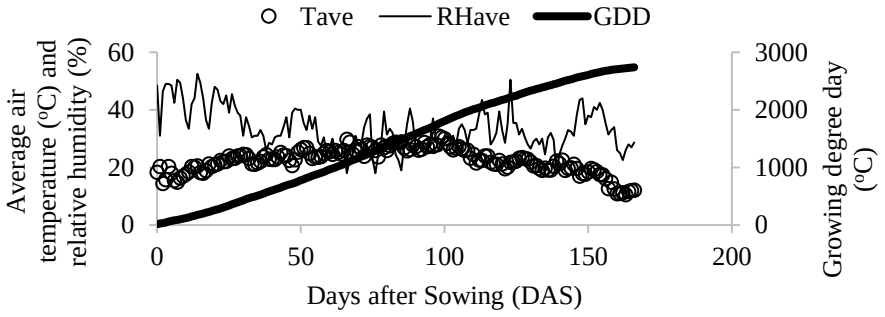



**Fig. 1- Variation in meteorological parameters during the growing season**

**شکل ۱- تغییرات پارامترهای هواشناسی در طول فصل کاشت**

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45245.2099

**جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک آزمایش در لایسیمترها**

**Table 1- The physical properties of the experimental soil in the lysimeters.**

| Texture | Depth (cm) | Field capacity ($cm^3\ cm^{-3}$) | Permanent wilting point ($cm^3\ cm^{-3}$) | Bulk density ($g\ cm^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|
| Clay loam | 0-30 | 28.25 | 13.29 | 1380 |
| Silty clay loam | 30-60 | 29.02 | 14.42 | 1410 |
| Silty clay | 60-120 | 30.50 | 14.87 | 1360 |

* Physical soil properties are obtained from Ahmadi et al. (2019)

**مدیریت آبیاری و ضریب تبخیر-تعرق**

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، نمونه‌هایی از خاک بوسیله آگر دستی از هر لایسیمتر در روز قبل از آبیاری بصورت جداگانه و تا عمق ۶۰ سانتی‌متر با فواصل ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد و پس از انتقال به آزمایشگاه وزن تر نمونه‌ها اندازه‌گیری و سپس در آون و دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و با توجه به چگالی ظاهری خاک رطوبت حجمی خاک تعیین شد. آب مورد نیاز هر لایسیمتر هر هفت روز یکبار بر مبنای رساندن رطوبت نیمرخ خاک تا عمق ریشه به حد ظرفیت زراعی با استفاده از معادله (۱) محاسبه و به گیاهان داخل آن لایسیمتر و به صورت آبیاری سطحی داده شد.

$$I = \sum_1^n (FC_i - \theta_i)\Delta z_i \qquad (۱)$$

که در آن I مقدار آب آبیاری (cm)، FC رطوبت خاک در حالت ظرفیت زراعی ( $cm^3\ cm^{-3}$)، $\theta$ رطوبت خاک قبل از آبیاری ($cm^3\ cm^{-3}$)، i شماره هر لایه، n تعداد لایه‌های خاک و $\Delta z$ ضخامت لایه‌ی خاک (cm) می‌باشد.

همچنین در طول فصل رشد پنج نوبت رطوبت خاک بوسیله نوترون‌متر تا عمق ۶۰ سانتی‌متری به فواصل ۳۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. همچنین حجم آب زهکش شده بعد از هر آبیاری لایسیمترها، به‌وسیله ظروفی که در زیر زهکش‌ها تعبیه شده بود، اندازه‌گیری شد.

تبخیر-تعرق گیاه استاندارد پیاز ($ET_C$) با استفاده از روش بیلان آب (معادله ۲) تعیین شد:

$$ET_C = P + I - D \pm \Delta W \qquad (۲)$$

که در آن $ET_C$ تبخیر- تعرق استاندارد گیاهی برحسب mm ، P میزان بارندگی بر حسب mm، I عمق آب آبیاری بر حسب mm، و $\Delta W$ تفاوت رطوبت خاک در عمق ریشه بین دو آبیاری متوالی بر حسب mm می‌باشد.

تبخیر از سطح خاک (E) به‌وسیله میکرولایسیمترهایی که دارای ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر نه سانتی‌متر بودند و از جنس PVC ساخته شده بودند، اندازه‌گیری شد. هر میکرولایسیمتر با خاک مربوط به همان لایسیمتر پر شده و در ارتفاع یکسان با سطح خاک داخل لایسیمتر در بین ردیف‌های کشت قرار داده شد. این میکرولایسیمترها همراه با آبیاری گیاهان داخل لایسیمترها آبیاری شدند و وزن آن‌ها قبل از آبیاری و همچنین روز بعد از آبیاری بوسیله ترازوی حساس اندازه‌گیری شدند. تفاوت وزن بین دو اندازه‌گیری برابر با تبخیر از سطح لایسیمتر در نظر گرفته شد. اختلاف وزن آنها بر سطح مقطع آنها تقسیم شده و ارتفاع تبخیر در آن بازه زمانی به‌دست آمد.

مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله پنتمن – مانتیث –فائو اصلاح شده برای منطقه باجگاه توسط Razzaghi و Sepaskhah (2012) محاسبه شد. معادله تبخیر- تعرق گیاه مرجع بقرار زیر است:

$$ET_o = \frac{0{\cdot}408 \times (Rn - G) + \gamma \times \frac{2214.12}{T_m + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + (1 + 0{\cdot}84 \times U_2)} \qquad (۳)$$

که در آن $ET_o$ تبخیر-تعرق گیاه مرجع ($mm\ d^{-1}$)، $R_n$ تابش خالص در سطح زمین ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$)، (es-ea) کمبود فشار بخار اشباع (kPa)، $T_m$ متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین (˚C)، $u_2$ سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m\ S^{-1}$)، $\Delta$ شیب منحنی فشار بخار ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$) و $\gamma$ ضریب ثابت سایکرومتری ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$) می‌باشد.

ضریب گیاهی یگانه ($K_c$) از نسبت $ET_c$ به $ET_o$ بصورت معادله (۴)تعیین شد:

$$Kc = \frac{ET_c}{ET_o} \qquad (۴)$$

ضریب گیاهی دوگانه خاک از معادله (۵) محاسبه شد:

$$Kc = Kcb + Ke = \frac{T}{ET_o} + \frac{E}{ET_o} \qquad (۵)$$

که در آن Kcb ضریب گیاهی پایه، Ke ضریب تبخیر، E تبخیر از سطح خاک بر حسب mm و T تعرق از سطح گیاه بر حسب mm می‌باشد. مقدار تعرق از تفاوت بین $ET_c$ و E محاسبه گردید.

**تعیین تبخیر-تعرق استاندارد پیاز به روش مستقیم**

مقدار تبخیر-تعرق استاندارد پیاز به روش مستقیم با استفاده از معادله پنمن-فائو (۶) ) در نرم‌افزار *Excel* و افزونه *Solver* محاسبه شد (Allen et al., 1998):

$$ET_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a}\right)}{\lambda\left[\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)\right]} \quad (۶)$$

$$r_a = \frac{4.72\left(1n\left(\frac{Z_m - d}{Z_0}\right)\right)^2}{1 + 0.54U} \quad (۷)$$

$$d = c_1 \times h \quad (۸)$$

$$Z_0 = c_2 \times h \quad (۹)$$

$$r_c = \frac{c_3 - (c_4 \times R_n)}{LAI} \quad (۱۰)$$

که در معادله‌های فوق، $ET_c$ تبخیر-تعرق گیاه پیاز mm ($d^{-1}$)، ρ چگالی هوا ($\frac{Kg}{m^3}$)، $c_p$ ضریب گرمایی ویژه برای هوای مرطوب اطراف در فشار ثابت ($KJ\ kg^{-1}\ °C^{-1}$)، $r_a$ مقاومت آیرودینامیکی ($s\ m^{-1}$)، $Z_m$ ارتفاعی که سرعت باد در آن اندازه-گیری می‌شود (m) که برابر با دو متر می‌باشد، d تغییر سطح مبدأ یا جابه‌جایی سطح صفر (m)، $Z_o$ طول زبری مؤثر بر انتقال گرما و بخار آب (m)، $h_c$ ارتفاع گیاه (m)، و U سرعت باد ($m\ s^{-1}$)، $r_c$ مقاومت گیاهی ($s\ m^{-1}$)، و LAI شاخص سطح برگ ($m^2\ m^{-2}$)، و ضرایب $C_1$، $C_2$، $C_3$، و $C_4$ ضرایب ثابت می‌باشند. برای محاسبات $r_a$ و $r_c$ به‌ترتیب از معادله‌های ارایه شده در Thom و Oliver (1977) و Allen (1986) استفاده گردید. برای انجام این کار، با توجه به اینکه مدت زمان پژوهش یک فصل کاشت بوده است، نصف از داده‌های هواشناسی و تبخیر-تعرق استاندارد پیاز تعیین شده از معادله (۲) در طول فصل کشت برای واسنجی ضرایب و از نصف دیگر برای اعتبارسنجی استفاده گردید.

### ارتفاع گیاه

ارتفاع گیاه در طول فصل رشد (۸۰، ۹۸، ۱۳۲و ۱۴۷روز بعد از کشت) در بوته‌های علامت‌گذاری شده توسط خط‌کش از سطح خاک تا نوک گیاه (برحسب سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها یک روز مانده به زمان آبیاری صورت گرفت.

### دمای سبز پوشش گیاهی

دمای پوشش گیاهی با استفاده از دماسنج مادون قرمز (Kyorisu Model 5500) در طول فصل رشد (۱۳۱ و ۱۴۵روز بعد از کاشت) اندازه‌گیری شد. در هنگام خواندن دما، باید دستگاه در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از سطح برگ گیاه و زاویه ۴۵ درجه قرارگرفته و سپس اندازه‌گیری‌ها انجام شود. اندازه‌گیری‌ها یک روز مانده به زمان آبیاری و در ساعت ۱۵-۱۳صورت گرفت.

### شاخص سطح برگ (LAI)

شاخص سطح برگ از نسبت سطح کل برگ‌های گیاه بر حسب ($cm^2$) به سطح سایه‌انداز گیاه روی زمین به‌دست می‌آید. مساحت برگ‌ها در طول فصل رشد (۸۰، ۹۸، ۱۳۲ و ۱۴۷روز بعد از کاشت) با دستگاه مساحت سنج اندازه‌گیری شد. برای این کار در هر نوبت از هر لایسیمتر به‌صورت جداگانه یک بوته از سطح خاک قطع شده و به آزمایشگاه انتقال داده شد. قسمت زیرزمینی گیاه در زمین باقی ماند و در پایان فصل رشد برداشت گردید. قسمت هوایی قطع شده برای اندازه‌گیری سطح برگ، بعد از اندازه‌گیری در آون خشک گردید و وزن برگ‌های خشک شده به مجموع وزن خشک برگ‌های هر لایسیمتر اضافه شد. شاخص سطح برگ از معادله زیر استخراج گردید:

$$\mathrm{LAI} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{A_C}} \quad (۱۱)$$

که در آن LAI شاخص سطح برگ ($cm^2 cm^{-2}$)، A مساحت برگ‌های هر گیاه ($cm^2$) و AC مساحت اشغال شده توسط گیاه که از حاصل ضرب فاصله بوته‌ها (۱۵ سانتی‌متر) در فاصله ردیف‌های کشت (۲۵ سانتی‌متر) در مزرعه بر حسب ($cm^2$) به‌دست آمد.

### نیتروژن کاه و کلش، سوخ و ریشه

برای بدست آوردن غلظت نیتروژن کاه و کلش، سوخ و ریشه، نمونه‌های ۰/۱ گرمی از قسمت‌های کاه و کلش، سوخ و ریشه گیاهان هر لایسیمتر جداگانه آسیاب شده، داخل لوله‌های آزمایش کجلدال قرار داده شد و به روش کجدال اندازه‌گیری شد (Bremner, 1965).

### محصول غده، وزن تر و خشک، بهره‌وری آب

گیاهان در تاریخ ۲۸ مهر ( ۱۶۶ روز بعد از کشت) برداشت شدند و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس سوخ‌ها از بقیه گیاه جدا شد و با کولیس قطر پیازها اندازه‌گیری و وزن شدند و روی هر پیاز برچسب زده شد و داخل آون در دمای ۷۰ درجه قرار داده شدند تا خشک شوند. برگ‌های قسمت فوقانی هر لایسیمتر نیز به‌صورت جداگانه به‌مدت ۷۲ ساعت در آون گیاهی در دمای ۷۰ درجه خشک شدند و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد.

بهره‌وری آب به ازای تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز از معادله (۱۲)، به‌ازای آب آبیاری از معادله (۱۳) و به ازای مجموع آب آبیاری و باران از معادله (۱۴) بدست آمد (Fernández et al., 2020) که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$WP_c = \frac{Y}{ET_c} \quad (۱۲)$$

$$WP_I = \frac{Y}{I} \quad (۱۳)$$

$$WP_{I+P} = \frac{Y}{I+P} \quad (۱۴)$$

که در آن $WP_c$ بهره‌وری آب به ازای تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز بر حسب ($kg\ m^{-3}$)، $WP_I$ بهره‌وری آب به ازای آب

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45245.2099

آبیاری بر حسب( $kg\ m^{-3}$) ، $WP_{IP}$ بهره‌وری آب آبیاری و باران بر حسب ( $kg\ m^{-3}$)، Y محصول دانه بر حسب ( $kg\ ha^{-1}$)، تبخیر–تعرق گیاهی برحسب ($kg\ ha^{-1}$)، I مقدار آب آبیاری در کل دوره رشد گیاه بر حسب( $m^3\ ha^{-1}$) و P میزان بارندگی در طول فصل رشد بر حسب ($m^3\ ha^{-1}$) می‌باشد. مقدار آب آبیاری با استفاده از مجموع حجم آبیاری‌های انجام شده در هر نوبت آبیاری به‌دست آمد. مقدار بارندگی هم از بارندگی‌های ثبت شده در ایستگاه هواشناسی نزدیک محل تحقیق گرفته شد.

### درجه روز رشد (GDD)

برای محاسبه درجه روز رشد (Growing degree day, GDD) از معادله (۱۰) استفاده شد.

$$GDD = \sum_0^n T_{ave} - T_b \qquad (۱۵)$$

که در آن $T_{ave}$ دمای متوسط روزانه حسب درجه سانتی‌گراد و $T_b$ دمای پایه برای پیاز می‌باشد که برابر با ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. (Tesfay, 2005).

## نتایج و بحث

### مراحل رشد گیاه

در تحقیقی Allen et al. (1998) مراحل رشد گیاه را به چهار مرحله رشد اولیه، توسعه، میانی و نهایی تقسیم‌بندی کردند. در این پژوهش طول مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و نهایی رشد به‌ترتیب ۵۶، ۶۴، ۲۵ و ۲۱ روز تعیین شد.

### ضریب گیاهی یگانه

میانگین مجموع آب آبیاری، مجموع بارندگی، مجموع آب زهکشی، مجموع تبخیر از سطح خاک، مجموع تعرق و مجموع تبخیر–تعرق استاندارد گیاه پیاز ($ET_c$) در طول فصل رشد در هر سه لایسیمتر در جدول (۲) آورده شده است. همچنین تغییرات تبخیر–تعرق گیاه مرجع ($ET_0$) و $ET_c$ در طول فصل رشد در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه شکل (۱) و (۲) از زمان کاشت تا حدودا ۵۰ روز بعد از کاشت، نه تنها متوسط دمای هوا، $ET_0$ و $ET_c$ با شیب نسبتا زیادی روند افزایشی داشته است، بلکه اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین $ET_0$ و $ET_c$ وجود دارد (حدودا سه میلی‌متر بر روز) که ناشی از رشد کند پیاز در ابتدای فصل کاشت می‌باشد. مقدار $ET_c$ برابر با ۲/۲۹ میلی‌متر بر روز در روز ابتدای کاشت نشان دهنده میزان تبخیر از سطح خاک می‌باشد (شکل ۲). میانگین مقادیر ضرایب گیاهی یگانه ($K_c$) در روزهای مختلف بعد از کاشت در شکل (۳) آورده شده است. میانگین ضرایب گیاهی یگانه برای لایسیمترهای تحت کشت در مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد پیاز به‌ترتیب برابر۰/۵۰، ۱/۰۴ و ۰/۷ محاسبه شد. مقدار GDD مورد نیاز برای مراحل اولیه، میانی و نهایی رشد به ترتیب برابر ۸۸۸/۹، ۲۰۴۳/۸ و ۲۷۴۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از ضرایب گیاهی به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در مراحل اولیه رشد به‌خاطر رشد کند پیاز و کم بودن تعرق، ضریب گیاهی پایین بوده و در مراحل توسعه و رشد میانی با رشد گیاه ضریب گیاهی نیز به تدریج افزایش پیدا کرده است. در مرحله پایانی رشد مقدار ضریب گیاهی شروع به کاهش کرده است که به‌دلیل زرد شدن تدریجی اندام هوایی وکاهش تعرق از سطح برگ‌های پیاز می‌باشد. همچنین میانگین مقدار تبخیر–تعرق استاندارد پیاز ۶۵۱/۲ میلی‌متر محاسبه گردید. مقدار ضریب گیاهی یگانه توسط Allen et al. (1998) برای پیاز در مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۷، ۱/۰۵ و ۰/۸ پیشنهاد شد.

**جدول ۲- میانگین مقدار آب آبیاری (I)، بارندگی (R)، زهکش (D)، تبخیر (E)،تعرق (T)، تعرق و تبخیر–تعرق ($ET_c$) پیاز در طول فصل کاشت**

**Table 2- Average amount of irrigation water (I), rainfall (R), drainage (D), evaporation (E), transpiration (T) and evapotranspiration ($ET_c$) of onion during growing season**

| I(mm) | R(mm) | D(mm) | E(mm) | T(mm) | $ET_C$(mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 490.2±19.3 | 3.325 | 12.2±0.9 | 355.2±1.3 | 296±2.0 | 651.2+1.5 |

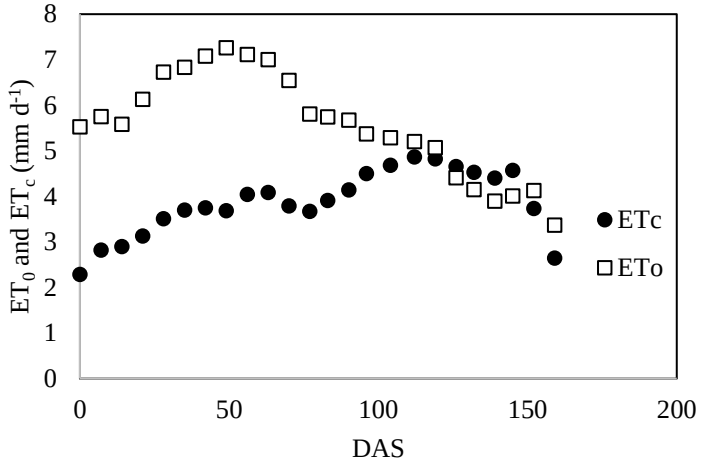



**Fig. 2- The variation of reference crop evapotranspiration ($ET_0$) and onion standard crop evapotranspiration ($ET_c$) during the growing season (DAS: Days after sowing)**

**شکل ۲- تغییرات تبخیر-تعرق گیاه مرجع ($ET_0$) و تبخیر-تعرق گیاه استاندارد پیاز ($ET_c$) در طول فصل کاشت (DAS: روز بعد از کاشت)**

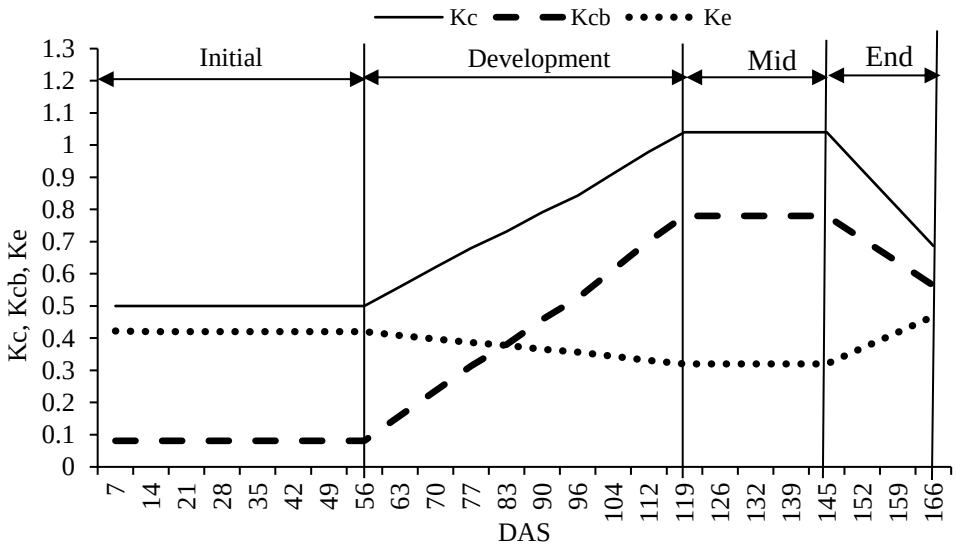



**Fig. 3- The average of single crop coefficient ($K_c$), basal crop coefficient ($K_{cb}$) and evaporation crop coefficient ($K_e$) in three lysimeters during the growing season (DAS)**

**شکل ۳- میانگین ضریب گیاهی یگانه ($K_c$)، ضریب گیاهی پایه ($K_{cb}$) و ضریب تبخیر ($K_e$) در سه لایسیمتر در طول فصل کاشت (DAS)**

ضریب یگانه گیاه پیاز در مرکز تحقیقات کشاورزی ورر (Werer) در اتیوپی در فصل اصلی کشت (July - October) در مراحل اولیه، میانی و نهایی رشد به‌ترتیب ۰/۵۷، ۱/۰۳ و ۰/۷۸ و در طول فصل سرد (March – June) ضریب گیاهی ۰/۴۹، ۱/۰۱ و ۰/۷۹ محاسبه گردید. همچنین تبخیر-تعرق بالقوه گیاه پیاز در طول فصل اصلی کشت برابر ۵۲۵/۸ میلی‌متر و در طول فصل سرد برابر ۴۶۵/۶ میلی‌متر به‌دست آمد (Abebe et al., 2021). ضریب گیاهی یگانه پیاز در اتیوپی در مراحل اولیه رشد، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۴۷، ۰/۹۹ و ۰/۴۶ به‌دست آمده است (Bossie et al., 2009). همچنین، طبق پژوهش دیگری که در این کشور روی ضریب گیاهی یگانه پیاز صورت گرفت مقادیر ضریب گیاهی در مراحل اولیه رشد، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۳۴، ۱/۰۱ و ۰/۶۸ محاسبه گردید (Dirirsa et al., 2015). در پژوهشی که در اسپانیا صورت گرفت مقادیر ضریب گیاهی یگانه پیاز در مراحل اولیه رشد، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۶۵، ۱/۲۰ و ۰/۷۵ اندازه‌گیری شد (López-Urrea et al., 2009). همچنین در پژوهش دیگری در کشور برزیل انجام شد گرفت مقادیر ضریب گیاهی یگانه پیاز در مراحل اولیه رشد، میانی

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45245.2099

و پایانی رشد به ترتیب برابر ۰/۶۸، ۰/۹۹ و ۰/۷۳ محاسبه شد (Matsunaga et al., 2022). محققان زیادی بیان کردند که مقادیر ضرایب گیاهی به نوع رقم، تراکم گیاه، نوع سیستم آبیاری و اقلیم منطقه وابسته می‌باشد (Allen et al., 1998; López-Urrea et al., 2009; Pereira et al., 2024).

**ضریب گیاهی دوگانه**

میانگین مقادیر ضریب تبخیر ($K_e$) و ضریب گیاهی پایه ($K_{cb}$) در شکل (۳) آورده شده است. میانگین ضریب تبخیر برای لایسیمترهای تحت کشت در مراحل اولیه، میانی و نهایی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۴۲، ۰/۲۶ و ۰/۴۷ به‌دست آمده است. مقدار ضریب گیاهی پایه نیز برای لایسیمترهای تحت کشت به‌ترتیب برابر ۰/۰۸، ۰/۷۸ و ۰/۲۲ محاسبه شده است. از مقادیر فوق می‌توان نتیجه گرفت که ضریب گیاهی پایه در مراحل اولیه رشد به‌خاطر رشد کند پیاز و کم بودن اندام هوایی، پایین بوده و با رسیدن گیاه به حداکثر رشد در مرحله میانی این ضریب نیز به حداکثر مقدار خود رسیده است و در مرحله نهایی رشد با زرد شدن برگ‌ها و تمرکز بیشتر گیاه بر روی تشکیل سوخ این مقدار کاهش می‌یابد. همچنین از مقادیر ضریب تبخیر می‌توان فهمید که در ابتدای فصل رشد بدلیل پوشیده نشدن سطح خاک توسط اندام هوایی و عدم ایجاد سایه‌اندازی گیاه پیاز، ضریب تبخیر بالا بوده و به‌تدریج در مراحل میانی و نهایی رشد کاهش یافته است ولی در مرحله نهایی رشد دوباره این مقدار افزایش یافته است که به‌خاطر خشک شدن تدریجی اندام هوایی گیاه و قرار گرفتن سطح زیر پوشش گیاهی در معرض تابش خورشید می‌باشد. پژوهشی با هدف تعیین ضرایب گیاهی پایه پیاز کاشته شده در لایسیمتر با تراکم ششصدهزار بوته در هکتار در کشور اسپانیا انجام شد و مقدار ضریب گیاهی پایه در در مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۶۰، ۱/۱۰ و ۰/۶۵ اندازه‌گیری شد (López-Urrea et al., 2009). همچنین، ضریب گیاهی پایه پیاز در مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۱۵، ۱/۰۵ و ۰/۷۰ و ضریب تبخیر در مراحل فوق به‌ترتیب برابر ۰/۵۵، نزدیک صفر و ۰/۱۰ ارایه شده است (Allen et al., 1998). Benli et al. (2006) در پژوهشی که با استفاده از لایسیمتر انجام دادند، ضریب گیاهی پایه ($K_{cb}$) یونجه در مراحل اولیه رشد، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب برابر ۰/۷۱، ۱/۷۸ و ۱/۵۱ محاسبه شد. ضریب گیاهی یگانه و ضریب گیاهی پایه نعنا فلفلی در مراحل رشد اولیه، توسعه و پایانی رشد به‌ترتیب ۰/۶۹، ۱/۰۳، ۱/۲۷ و ۰/۲۹، ۰/۸۶، ۱/۲۷ محاسبه شد. همچنین میانگین نیاز آبی نعنا فلفلی در دو لایسیمتر ۵۶۶/۴ و ۶۶۴/۴ میلی‌متر به‌دست آمد (Ghamarnia and Mousabeygi, 2014). در پژوهش دیگری که Ghamarnia et al. (2014) در کرمانشاه روی زیره سیاه انجام دادند، مقادیر ضریب گیاهی دوگانه برای مراحل رشد ابتدایی، میانی و پایانی را به‌ترتیب ۰/۲۴، ۱/۰۹ و ۰/۷۸ برآورد شد. همچنین مقدار نیاز آبی زیره سیاه ۷۲۴ میلی‌متر محاسبه شد.

**تبخیر-تعرق استاندارد پیاز به روش مستقیم**

مقدار تبخیر-تعرق استاندارد پیاز به روش مستقیم با استفاده از معادله‌های (۶) تا (۱۰) تعیین گردید. مقدار ضرایب ثابت $C_1$، $C_2$، $C_3$ و $C_4$ به‌ترتیب برابر با ۰/۷، ۰/۰۱، ۴۸۷/۵ و ۳/۹۷- تعیین گردید. رابطه بین مقادیر $ET_c$ محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با استفاده از لایسیمتر برای دو حالت واسنجی و اعتبار سنجی رسم گردید (شکل ۴). شیب نمودار خطی برازش داده شده بین $ET_c$ محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مرحله واسنجی تقریبا برابر با یک و مقدار ضریب همبستگی برابر با ۰/۸۳ به‌دست آمد (شکل 4a)، که بیانگر دقت خوب مقادیر محاسبه شده است. همچنین، شیب نمودار خطی برازش داده شده بین $ET_c$ محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مرحله اعتبارسنجی بیانگر این است که مقدار $ET_c$ محاسبه شده چهار درصد کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی ۰/۸۵ در مرحله اعتبارسنجی نیز بیانگر دقت قابل قبول مقادیر محاسبه شده است (شکل 4b).

**ارتفاع**

بیشترین ارتفاع گیاه در طول فصل رشد۷۱/۹ سانتی‌متر بود (شکل ۵). در مراحل انتهایی رشد پیاز به‌دلیل تمرکز گیاه بر تشکیل سوخ، اندام هوایی شروع به زرد شدن کرده و برگ‌های آن حالت افتاده به خود می‌گیرند. به همین دلیل با دقت در شکل‌های شاخص سطح برگ و ارتفاع مشاهده می‌شود که با وجود افزایش قابل توجه شاخص سطح برگ، ارتفاع روند رشدی کمتری نسبت به شاخص سطح برگ دارد. در پژوهشی که با بررسی سطوح مختلف نیتروژن انجام شد بیشترین ارتفاع گیاه پیاز ۵۶/۲ سانتی‌متر در سطح نیتروژن ۱۱۰ کیلوگرم بر هکتار حاصل گردید (Nawaz et al., 2017).

**شاخص سطح برگ**

در طی دوره رشد که ۱۶۶ روز بود، بیشترین میزان شاخص سطح برگ در ۱۴۷ روز بعد از کاشت و به مقدار ۳/۱ اندازه‌گیری شد (شکل ۶). با بررسی اثر تاریخ کشت‌های مختلف پیاز در منطقه نیشابور با فواصل کشت ۱۰ در ۳۰ سانتی‌متر مشاهده شد که بیشترین میزان شاخص سطح برگ برابر ۳/۱ می‌باشد (Rastegar and Khodadadi, 2008). طی پژوهشی که با بررسی محلول‌پاشی سطوح مختلف روی صورت گرفت، بیشترین میزان شاخص سطح برگ پیاز ۳/۴ گزارش گردید (Rafie et al., 2018). در شکل (۷) رابطه بین ارتفاع و شاخص سطح برگ رسم گردید. شیب معادله خطی بین ارتفاع و شاخص سطح برگ ۰/۰۴ و مقدار عرض از مبدا آن برابر صفر می‌باشد.

**دمای پوشش سبز**

تغییرات دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا در ساعت اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه در شکل (۸) آورده شده است. در ۱۳۱ روز بعد از کاشت مقدار دمای پوشش سبز حدودا برابر ۲۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد در حالی‌که دمای هوا ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در ۱۴۵ روز بعد از کاشت مقدار دمای پوشش سبز برابر ۲۶/۴ سانتی‌گراد می‌باشد در حالیکه دمای هوا برابر ۳۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. محدود تغییرات دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا نشان می‌دهد که گیاهان کاشته شده در لایسیمتر تحت تنش قرار ندارد. علاوه بر این، دامنه تغییرات دمای پوشش سبز گیاه اندازه‌گیری شده در محدوده دمای مطلوب رشد پیاز در مرحله تولید غده (۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، می‌باشد Ansari, (2007). همچنین، روند کاهشی دمای پوشش سبز در طول فصل رشد به‌دلیل حرکت به سمت فصل سرد سال می‌باشد.

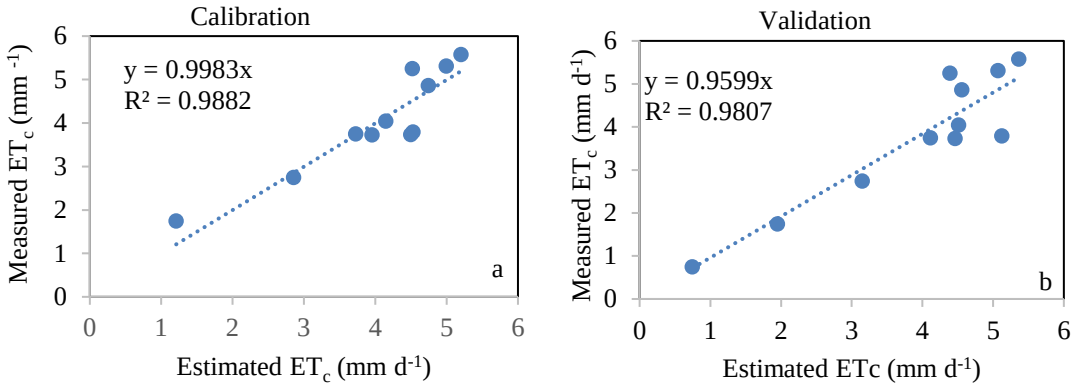



**Fig. 4- The relationship between the direct estimated and measured onion standard crop evapotranspiration ($ET_c$) a) calibration and b) validation data**

**شکل ٤- رابطه بین تخمین مستقیم و اندازه‌گیری تبخیر-تعرق استاندارد پیاز a) واسنجی و b) اعتبارسنجی)**

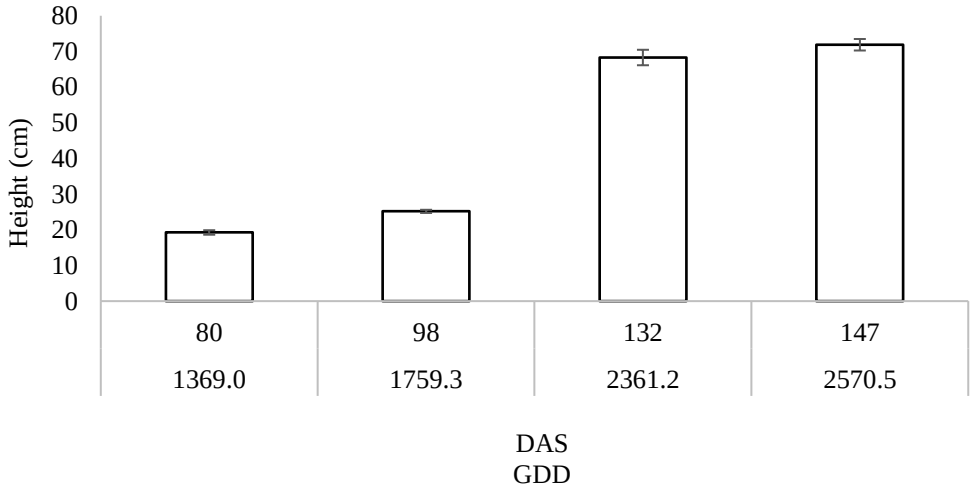



**Fig. 5- Changes in onion plant height during the growing season (DAS and GDD)**

**شکل ٥- تغییرات در ارتفاع گیاه پیاز در طول فصل کاشت (DAS و GDD)**

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45245.2099

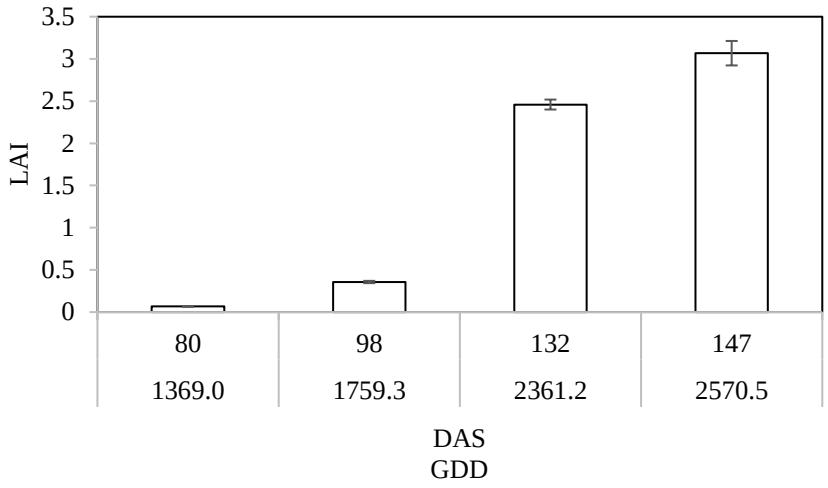



**Fig. 6- Changes in onion leaf index during the growing season (DAS and GDD)**
**شکل ٦- تغییرات در شاخص سطح برگ پیاز در طول فصل کاشت (DAS و GDD)**

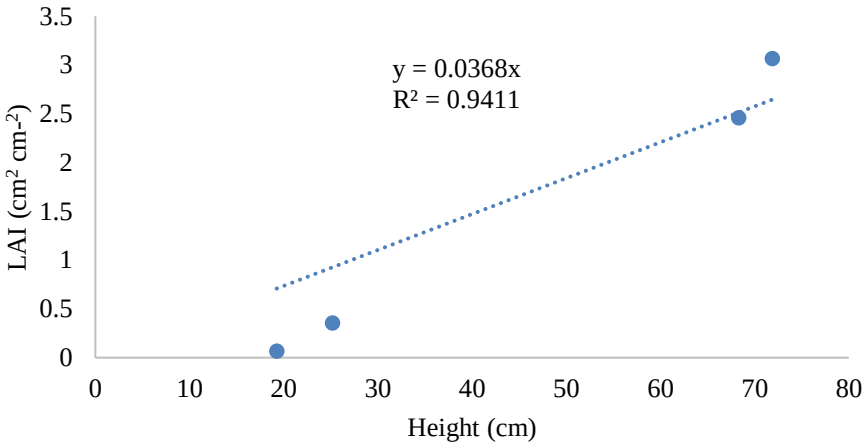



**Fig. 7- The relationship between onion leaf area index and height**
**شکل ۷- رابطه بین شاخص سطح برگ و ارتفاع**

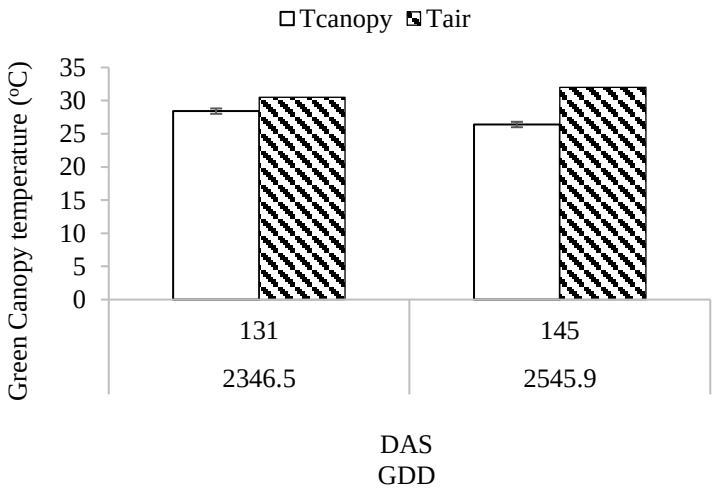



**Fig. 8- Onion green canopy temperature and air temperatur during the growing season (DAS and GDD)**
**شکل ۸- دمای پوشش سبز پیاز و دمای هوا در طول فصل کاشت (DAS و GDD)**

**جدول ۳- میانگین غلظت نیتروژن در کاه و کلش، غدم و ریشه پیاز در زمان برداشت**

**Table 3- Average nitrogen concentration in straw, bulbs and roots of onion at harvest**

| Straw nitrogen (%) | Bulb nitrogen (%) | Root nitrogen (%) |
|---|---|---|
| 2.1±0.1 | 1.96±0.2 | 2.24±0.3 |

**جدول ٤- مقدار وزن تر و خشک پیاز در انتهای فصل رشد**

**Table 4- Amount of onion leaf and bulb wet and dry weight at the end of the growing season**

| Wet leaf weight (ton $ha^{-1}$) | Wet bulbs weight (ton $ha^{-1}$) | Leaf dry weight (ton $ha^{-1}$) | Bulb dry weight (ton $ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 27.8 ± 5.51 | 23.93 ± 1.34 | 3.16 ± 0.45 | 3.73 ± 0.37 |

**جدول ٥- بهره‌وری آب به ازای آب آبیاری، آب آبیاری و بارندگی و تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز**

**Table 5- Water productivity based on irrigation water ($WP_I$), water productivity based on irrigation water and rainfall ($WP_{I+P}$), and crop water productivity ($WP_c$) of onion**

| $WP_I$ (kg $m^{-3}$) | $WP_{I+P}$(kg $m^{-3}$) | $WP_c$(kg $m^{-3}$) |
|---|---|---|
| 4.89±0.13 | 4.85±0.13 | 4.1±0.53 |

**غلظت نیتروژن کاه و کلش، سوخ و ریشه**

مقادیر غلظت نیتروژن کاه و کلش، سوخ و ریشه در جدول (۳) آورده شده است.درصد غلظت نیتروژن کاه و کلش، سوخ و ریشه به‌ترتیب برابر ۲/۱، ۱/۹۶ و ۲/۲۴ می‌باشد. در تحقیق دیگری، با استفاده از مقدار ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن، درصد غلظت نیتروژن اندام هوایی ذرت علوفه‌ای ۱/۲۵ درصد گزارش شد (Khodshenas et al., 2016). همچنین در پژوهشی توسط Mohammadi و Morshedi (2018) روی گیاه گندم مشاهده گردید بیشترین درصد نیتروژن غلظت اندام هوایی ۲/۹۰ درصد و مربوط به سطح کود ۵۰ کیلوگرم بر هکتار نیتروژن خالص بوده است. در پژوهشی Lorenz (1978) غلظت مجاز نیترات در پیاز را کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم وزن تاره اعلام کردند. با توجه به درصد غلظت نیتروژن سوخ اندازه‌گیری شده و کم بودن میزان نیتریت در خاک، این مقدار غلظت نیتروژن سوخ در محدوده مجاز قرار دارد.

**زیست توده گیاه پیاز**

میانگین مقادیر زیست توده گیاه پیاز در جدول (۴) آورده شده است. میانگین وزن تر و خشک برگ‌های پیاز در انتهای فصل رشد به‌ترتیب برابر با ۲۸ و ۳/۲ تن بر هکتار به‌دست آمد و همچنین، میانگین وزن تر و خشک غده‌های پیاز در انتهای فصل رشد به‌ترتیب ۲۳/۹ و ۳/۷ تن بر هکتار بود. طی پژوهشی که Backes et al. (2018) انجام دادند بیشترین مقدار وزن خشک غده پیاز ۴/۳ گرم به ازای هر بوته بود. در پژوهش دیگری اثر سه سطح آبیاری و کود نیتروژن بر رشد و محصول پیاز رقم زرگان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که میزان وزن خشک غده‌های پیاز در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و ۲۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن بر هکتار (به‌صورت اوره) برابر ۳/۵۸ گرم به‌دست آمد (Roohparvar, 2020). در پژوهش دیگری با در نظر گرفتن رژیم‌های آبیاری ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی بر روی محصول پیاز به این نتیجه رسیدند که کمترین و بیشترین وزن تر غده‌های پیاز به ترتیب برابر ۵/۵ تن در هکتار ( تیمار ۲۵ درصد نیاز آبی) و ۲۵ تن در هکتار (آبیاری کامل) به‌دست آمد ( Bekele and Tilahun, 2007). در پژوهش دیگری که در کشور برزیل انجام شد مقدار وزن تر پیاز در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد برابر با ۴۳/۸۶ تن بر هکتار به‌دست آمد که در مقایسه با پژوهش حاضر به‌دلیل بارش بیشتر در طول دوره کاشت، بیشتر می‌باشد (Matsunaga et al., 2022). مقدار وزن تر غده‌های پیاز در تیمار آبیاری کامل برابر با ۴۵/۸ تن در هکتار در کشور کلمبیا در منطقه مطالعاتی Motilonia و در شرایط گلخانه‌ای به‌دست آمد که به‌علت تراکم کمتر در زمان کاشت و عدم ایجاد رقابت در جذب آب و مواد غذایی بین بوته‌ها، بیشتر از پژوهش حاضر بوده باشد (Terán-Chaves et al., 2023).

**بهره‌وری آب**

مقادیر بهره‌وری آب آبیاری، بهره‌وری آب آبیاری و باران و بهره‌وری آب به ازای تبخیر-تعرق در جدول (۵) آورده شده است. مقادیر بهره‌وری آب آبیاری، بهره‌وری آب آبیاری و باران و بهره‌وری آب به ازای تبخیر-تعرق استاندارد پیاز به‌ترتیب برابر با ۴/۹، ۴/۸ و ۴/۱ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. با اعمال روش‌های مختلف آبیاری روی گیاه پیاز مشاهده شد که بیشترین بهره‌وری مصرف آب مربوط به روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با مقدار ۵/۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار و کمترین مقدار بهره‌وری مصرف آب مربوط به روش آبیاری سطحی با مقدار ۲/۳۳ کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار می‌باشد (Piri, 2018). بهره‌وری آب به ازای تبخیر-تعرق در پژوهشی که در کشور برزیل

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45245.2099

انجام شده بود، در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد برابر با ۱/۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد (Matsunaga et al., 2022). همچنین مقدار بهره‌وری آب آبیاری در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد و در شرایط گلخانه به‌ترتیب برابر با ۳/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد (Terán-Chaves et al., 2023). بهره‌وری آب به ازای تبخیر–تعرق و یا به‌ازای آب مصرفی نه تنها به اقلیم مناطق یلکه به ارقام مورد استفاده و روش آبیاری بستگی دارد (Ramalan, et al., 2010; Igbadun et al., 2012; Terán-Chaves et al., 2023).

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق مقادیر تبخیر–تعرق گیاه پیاز با استفاده از نتایج لایسیمتری به‌دست آمده و با روش بیلان آب تعیین گردید. مقدار $ET_C$ برای لایسیمترهای تحت کشت پیاز برابر ۶۵۱/۲ میلی‌متر و متوسط مقدار T برابر ۲۹۶ میلی‌متر محاسبه شد. مقدار ضریب گیاهی یگانه در مرحله اولیه رشد برای لایسیمترهای تحت کشت ۰/۵۰، در مرحله میانی رشد گیاه ۱/۰۴ و همچنین در مرحله نهایی رشد ۰/۷ محاسبه شد. مقدار ضریب $K_e$ در مرحله اولیه رشد برای لایسیمترهای تحت کشت ۰/۴۲، در مرحله میانی رشد گیاه ۰/۲۶ و همچنین در مرحله نهایی رشد ۰/۴۷ محاسبه شد. همچنین مقدار ضریب $K_{cb}$ در مرحله اولیه رشد برای لایسیمترهای تحت کشت ۰/۰۸، در مرحله میانی رشد گیاه ۰/۷۸ و همچنین در مرحله نهایی رشد برابر ۰/۲۲ محاسبه شد. مقادیر مورد نظر برای مدیریت و برنامه ریزی دقیق آب آبیاری مورد نیاز گیاه پیاز در مناطقی که با اقلیم خشک و نیمه خشک (به‌خصوص در استان فارس) کشت می‌شوند، کاربرد داشته و می‌تواند مورد استفاده کشاورزان، محققان، طراحان و مهندسین مشاور قرارگیرد. همچنین تعیین دقیق ضرایب گیاهی دوگانه می‌تواند در مدل‌سازی دقیق رشد گیاه کمک شایانی نماید.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت دانشگاه شیراز، مرکز مطالعات خشکسالی و قطب علمی مدیریت آب در مزرعه تشکر و قدردانی می نماید.

## References

1- Abebe, N., Kebede, E., Derese, Y., Robi, F. and Nanesa, K., 2021. Determination Crop Coefficients and Water Requirement of Onion by Using Lysimeter at Werer, Middle Awash Valley of Ethiopia. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences (IJRSAS*), *7(3),* pp.14-21. Doi: 10.37421/2168-9768.2021.10.261.

2- Ahmadi, S.H., Solgi, S. and Sepaskhah, A.R., 2019. Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot and semi-arid area under three planting densities. *Agricultural Water Management*, *225*, pp:105784. Doi: 10.1016/j.agwat.2019.105784.

3- Allen, R.G., 1986. A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, *112 (4),* pp:348-368. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:4(348).

4- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO- Rome.

5- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D. and Wright, J.L., 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *131*(1), pp:2-13. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2)

6- Aminpour, R. and Mortazav Bak, A., 2012. Study of Quantitative and Qualitative Characteristics of Short Day Onion Cultivars in Isfahan. *Journal of Horticultural Science*, *25*(4). pp:404-410. Doi: 10.22067/JHORTS4.V1390I0.11608 (In Persian).

7- Ansari N.A., 2007. Effect of density, cultivars and sowing date on Onion sets production. *Asian Journal of Plants Science, 6,* pp:1147-1150. Doi: 10.3923/ajps.2007.1147.1150.

8- Backes, C., Villas Boas, R.L., Godoy, L.J.G.D., Vargas, P.F. and Santos, A.J., 2018. Determination of growth and nutrient accumulation in Bella Vista onion. *Revista Caatinga*, *31*(1), pp:246-254. Doi: 10.1590/1983-21252018v31n129rc

9- Bekele, S. and Tilahun, K., 2007. Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia. *Agricultural Water Management, 89*(1-2), pp:148-152. Doi: 10.1016/j.agwat.2007.01.002.

10- Benli, B., Kodal, S., Ilboyi A. and Ustun H., 2006. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. *Agricultural Water Management, 81*, pp:358-370. Doi: 10.1016/j.agwat.2005.05.003.

11- Bossie, M., Tilahun, K. and Hordofa, T., 2009. Crop coefficient and evapotranspiration of onion at Awash Melkassa, Central Rift Valley of Ethiopia. *Irrigation and Drainage Systems*, *23*(1), pp:1-10. Doi: 10.1007/s10795-009-9059-9.

12- Bremner, J.M., 1965. Total nitrogen. In: Black CA (ed) Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, Wisconsin, pp:1149–1178.

13- Ding, R., Kang, S., Zhang, Y., Hao, X., Tong, L., Du, T., 2013. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agricultural Water Management, 127*, pp:85–96. Doi: 10.1016/j.agwat.2013.05.018.

14- Dirirsa, G., Hordofa, T. and Bekele, D., 2015. Water requirement and crop coefficient of onion (Red Bombay) in the Central Rift valley of Ethiopia. *International Journal of Recent Research in Life Sciences*, *2*(1), pp:1-6.

15- Eigenbrod, C. and Gruda, N., 2015. Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*, pp:483-498. Doi: 10.1007/s13593-014-0273-y.

16- Fernández, J.E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V. and Cuevas, M.V., 2020. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural Water Management*, *237*, pp:106074. Doi: 10.1016/j.agwat.2020.106074.

17- Ghamarnia, H., Miri, E. and Ghobadei, M., 2014. Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (*Nigella sativa* L.) in a semi-arid climate. *Irrigation Science*, *32*(1), pp:67-76. Doi: 10.1007/s00271-013-0412-2.

18- Ghamarnia, H. and Mousabeygi, F., 2014. Determination of (Mentha pipertia L.) water requirement, single and dual crop coefficients. *Journal of Water and Soil*, *28*(4), pp:670-678. Doi: 10.22067/JSW.V0I0.22139 (In Persian) .

19- Gheysari, S.M., MirLatifi, M., Homaee, M. and Asadi, M.E., 2006. Determination of crop water use and crop coefficient of corn based on crop growth stages. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *26*(7), pp:125-142. (In Persian).

20- Igbadun, H. E., Ramalan, A. A. and Oiganji, E., 2012. Effects of regulated deficit irrigation and mulch on yield, water use and crop water productivity of onion in Samaru, Nigeria. *Agricultural Water Management*, *109*, pp:162-169. Doi: 10.1016/j.agwat.2012.03.006.

21- Karandish, F., Salari, S. and Darzi Naftchali, A., 2015. Spatial prioritizing of the onion producing in warm and arid regions (Case study: Sistan and Bluchestan Province). *Journal of Plant Production*, *22*(1), pp:191-209. Doi: 20.1001.1.23222050.1394.22.1.11.8 (In Persian).

22- Keykhamoghadam, P., Kamgar Haghighi, A., Sepaskhah, A. and Zand Parsa, S., 2013. Determination of Single and dual crop coefficients and potential evapotranspiration of developed saffron. *Journal of Agricultural Meteorology*, *1*(1), pp:1-13. (In Persian).

23- Khodshenas, M.A., Ghadbeiklou, J. and Dadivar, M., 2016. The effects of source and rate of nitrogen fertilizer and irrigation on nitrogen uptake of silage corn and residual soil nitrate. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)*, 29(6), pp:1640-1650. Doi: 10.22067/JSW.V29I6.35254 (In Persian).

24- López-Urrea, R., de Santa Olalla, F.M., Montoro, A. and López-Fuster, P.,2009. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (Allium cepa L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, *96*(6), pp:1031-1036. Doi: 10.1016/j.agwat.2009.02.004.

25- Lorenz, Q. A., 1978. Potential nitrate in edible plants part. (In: D. R. Nielson, J. G. Mac Donald eds.) Nitrogen in the environment, Vol. 2,8. Soil & plant & Nitrogen relationships, Academic Press, New York.

26- Matsunaga, W. K., da Silva, V. D. P., Amorim, V. P., Sales, E. S., Dantas, S. M. and Oliveira, A. B., 2022. Evapotranspiration, crop coefficient and water use efficiency of onion cultivated under different irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *26*, pp:219-225. Doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p3-9.

27- Ministry of Agriculture-Jahad. 2021. https://www.maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/Amarnameh-J1-1401.pdf.

28- Mohammadi, M. and Morshedi, A., 2018. Effect of canola (*Brassica napus* L.) residue management and nitrogen fertilizer on wheat (*Triticumaestivum* L.) yield and some soil properties. *Iranian Journal of Soil*, *32*(2), pp:153-163. Doi: 10.22092/IJSR.2018.117038 (In Persian).

29- Nawaz, M.Q., Ahmed, K., Hussain, S.S., Rizwan, M., Sarfraz, M., Wainse, G.M. and Jamil, M., 2017. Response of onion to different nitrogen levels and method of transplanting in moderately salt affected soil. *Acta Agriculturae Slovenica*, *109*(2), pp:303-313. Doi: 10.14720/aas.2017.109.2.13.

30- Pereira, L.S., Paredes, P., Oliveira, C.M., Montoya, F., López-Urrea, R. and Salman, M., 2024. Single and basal crop coefficients for estimation of water use of tree and vine woody crops with consideration of fraction of ground cover, height, and training system for Mediterranean and warm temperate fruit and leaf crops. *Irrigation Science*, *42*(6), pp.1019-1058.Doi: 10.1007/s00271-023-00901-7.

31- Piri, H., 2018. Effect of different amounts of irrigation and nitrogen fertilizer on onion yield and water use efficiency in three irrigation methods. *Journal of Water Research in Agriculture, 32* (2), pp:187-200. Doi: 10.22092/jwra.2018.116953 (In Persian).

32- Rafie, M. R., Khoshgoftarmanesh, A. H., Shariatmadari, H. and Darabi, A., 2018. Dry matter accumulation pattern and growth rate of onion as affected by foliar application of various Zn fertilizer sources. *Iranian Journal of Soil Research, 31*(4), pp:559-572. Doi: 10.22092/IJSR.2018.115894 (In Persian).

33- Ramalan, A. A., Nega, H. and Oyebode, M. A., 2010. Effect of deficit irrigation and mulch on water use and yield of drip irrigated onions. *WIT Transactions on Ecology and the Environment, 134*, pp: 39-50. DOI:10.2495/SI100041.

34- Ran, H., Kang, S., Li, F., Tong, L., Ding, R., Du, T., Li, S. and Zhang, X., 2017. Performance of AquaCrop and SIMDualKc models in evapotranspiration partitioning on full and deficit irrigated maize for seed production under plastic film-mulch in an arid region of China. *Agricultural Systems, 151*, pp:20-32. Doi: 10.1016/j.agsy.2016.11.001.

35- Rastegar, J. and Khodadadi, M., 2008. Investigation on Growth Pattern and Yield of some Iranian Onion Cultivars and Landraces Based on the Physiological Indices. *Seed and Plant Journal, 24(4)*, pp:659-675. (In Persian).

36- Razmavaran, M. H., Sepaskhah, A. R. and Ahmadi, S. H., 2024. Revisiting reference evapotranspiration calculation under regional advection and its effect on single and dual crop coefficients: An empirical approach for quinoa crop. *Meteorological Applications, 31*(2), pp: e2189. Doi: 10.1002/met.2189.

37- Razzaghi, F. and Sepaskhah, A.R., 2010. Assessment of nine different equations for $ET_o$ estimation using lysimeter data in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *56*(1), pp:1-12. Doi: 10.1080/03650340902829180.

38- Razzaghi, F. and Sepaskhah, A. R., 2012. Calibration and validation of four common $ET_0$ estimation equations by lysimeter data in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science, 58*(3), pp:303-319. Doi: 10.1080/03650340.2010.518957.

39- Roohparvar, S., 2020. *Effect of Different Levels of Irrigation and Nitrogen Fertilizer on Growth and Yield of Onion (Zargan Cultivar)*. Msc thesis, Shiraz University, Iran.

40- Rostam Foroudi, B., 2006. Study on Quantitative and Qualitative Characters of Onion Cultivars and Determination of the Relation Between some Characters and Storability. *Seed and Plant Journal, 22(1),* pp:67-86. Doi: 10.22092/SPIJ.2017.110670 (In Persian).

41- Sepaskhah, A.R., Tavakoli, A.R. and Mousavi S.F., 2006. Principles and Applications of Deficit Irrigation. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (INCID), Tehran., 288 p. (In Persian).

42- Terán-Chaves, C.A., Montejo-Nuñez, L., Cordero-Cordero, C. and Polo-Murcia, S.M., 2023. Water Productivity Indices of Onion (Allium cepa) under Drip Irrigation and Mulching in a Semi-Arid Tropical Region of Colombia. *Horticulturae, 9(6),* pp:632. Doi: 10.3390/horticulturae9060632.

43- Tesfay, S.Z., 2005. *The effect of daylength and temperature on growth and 'onset of bulbing' in tropical cultivars of onion*. Doctoral dissertation, University of Kwazulu-Natal, South Africa.

44- Thom, A.S. and Oliver, H.R., 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, *103*(436), pp:345–357. Doi: 10.1002/qj.49710343610.

45- Zhang, B., Liu, Y., Xu, D., Zhao, N., Lei, B., Rosa, R.D., Paredes, P., Paço, T.A. and Pereira, L.S., 2013. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat–summer maize crop sequence in North China plain. *Irrigation Science, 31(6),* pp:1303–1316. Doi: 10.1007/s00271-013-0405-1

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 77-92**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Comparing the performance of machine learning methods in modeling daily reference ET and its spatial distribution (case study: Zanjan province)

S. Ganjei[1]* and A. H. Nazemi [2]

*1*- Corresponding Author, Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (siminganjei@tabrizu.ac.ir)*
*2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 25 October 2023
Revised: 13 May 2024
Accepted: 15 May 2024

*Keywords:*
GEP, GIS, MLR, RF, Reference Evapotranspiration.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Ganjei, S., Nazemi, A. H. (2025). 'Comparing the performance of machine learning methods in modeling daily reference ET and its spatial distribution (case study: Zanjan province)', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 77-92. doi: 10.22055/jise.2024.45305.2103.

## Introduction

Iran is one of the world's semi-arid and arid regions, it has serious water resource limitations. Two important independent processes of the hydrological cycle are the combined processes of subsoil evaporation and transpiration from plant. It is critical to estimate evapotranspiration accurately since a significant amount of water is lost through this process. The FAO Penman-Monteith method is among the mostly-used indirect methods to calculate evapotranspiration. In this method, the water demands of the plant are calculated using the plant coefficients after estimating the reference evapotranspiration (Allen et al., 1998). Researchers typically use several kinds of models for predicting evapotranspiration in an effort to select a model with the highest accuracy, lowest error, and fewest input variables. This is because the FAO Penman-Monteith method requires a larger number of data points despite having acceptable accuracy. These models can be utilized for prediction since they do not have the problems and expenses of direct methods. This category of models involves machine learning models, that have excellent modeling potential that is not only in the area of evapotranspiration predicts but also in other areas of hydrology (Malekahmadi et al., 2022). The purpose of this research is to compare the performance of machine learning methods including multiple linear regression (MLR), gene expression programming (GEP) and random forest (RF) in modeling daily reference evapotranspiration and its spatial distribution in Zanjan province.

## Materials and Methods

In the current research, the meteorological data of ten years (2009–2019) from the synoptic stations of Zanjan, Mahneshan, Khodabande and Khoramdare were used. The input of multiple linear regression (MLR), gene expression programming (GEP) and random forest (RF) models includes four meteorological parameters (average temperature, average relative humidity, wind speed and net radiation). In order to evaluate the accuracy of the models, the daily reference evapotranspiration of FAO Penman Monteith (FPM) was chosen as the standard method. To evaluate the performance of the models, one-third and two-thirds of the data were used for training and validation, respectively. Also,

to compare the performance of the machine learning methods with each other, the evaluation criteria including the Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of determination ($R^2$), Scatter Index (SI) and Wilmot Index (WI) were calculated and time series, dispersion and violin charts were drawn. On the other hand, the geostatistical technique was used for estimating the reference evapotranspiration in unmeasured points for zoning because of the limited number of available synoptic stations in Zanjan province. In order to analyze the spatial changes of reference evapotranspiration, its zoning was carried out after the highest-performing machine learning models were chosen, considering that it has not been evaluated in this manner before in the study area.

**Findings**

The random forest (RF) model in Zanjan station has good performance with WI = 0.991, SI = 0.109, and RMSE = 0.373(mm/day), $R^2$= 0.97; the gene expression programming (GEP) model in Khodabande station has the best performance with WI = 0.966, SI = 0.124, RMSE = 0.478(mm/day), and $R^2$ = 0.967 and the Multiple linear regression (MLR) model has the best performance in Zanjan station with WI = 0.955, SI = 0.08, RMSE = 0.276(mm/day), and $R^2$ = 0.983. After the random forest model, the gene expression programming model in Khodabandeh and Mahenshan stations and the multiple linear regression model in Khoramdare stations ranked second. In all stations, except for Zanjan station, where the MLR model performed well, the RF model has high accuracy and less error in estimating daily reference evapotranspiration. Given that the RF model has high accuracy in predicting daily reference evapotranspiration, the values of this model were used for evapotranspiration zoning using the inverse distance weighting (IDW) method. The created map showed that Reference evapotranspiration in Zanjan province is in the range of (3.466-4.273) mm/day. In the northwestern region of this province, its amount increases, and its highest amount is in the range of (4.020-4.273) mm/day at the Mahneshan station, which shows that the amount of precipitation and climatic conditions affect the amount of evaporation-transpiration.

**Conclusion**

Taking into consideration the important role of accurate evapotranspiration prediction in the design, planning, and management of irrigation networks and systems, in the present research, the synoptic data of 4 stations in Zanjan province for 10 years, including average temperature, average relative humidity, wind speed and net radiation were input to the model. Multiple linear regression (MLR), gene expression programming (GEP) and random forest (RF) were used to estimate daily reference evapotranspiration. According to the values of statistical indicators, the results showed that all three models have high accuracy and less error in estimating daily reference evapotranspiration, but the random forest (RF) model was chosen as the best model with a small difference. Based on the distribution of the values predicted by the machine learning models and comparing it with ET0-FPM values, the random forest (RF) model has less difference. Also, the closest violin chart to the ET0-FPM data is the random forest model chart, which shows the superiority of the random forest model over the other models. The results of zoning using the inverse distance weighting (IDW) method of this model showed that the rate of evapotranspiration is higher in the northwest of Zanjan province, especially in Mahenshan Station with (4.020-4.273) mm/day.

**Acknowledgement**

We acknowledge that the meteorological dataset utilized in this investigation was provided by the Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO).

**References**

1-Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO*, Rome, 300(9), D05109.

2-Malekahmadi, H., Mirzania, E., Khosravi, S., & Ebrahim Zadeh, A. (2022). Daily evapotranspiration modeling using regression and intelligent models (Case Study). *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 49-62. Doi.org/ 10.22034/IWRJ.2022.10026.2338 (In Persian).

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۹۲-۷۷

# مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی تبخیر-تعرق مرجع روزانه وتوزیع مکانی آن(مطالعه موردی: استان زنجان)

سیمین گنجه‌ای[1*] و امیر حسین ناظمی[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجو دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران siminganjei@tabrizu.ac.ir

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

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶

## چکیده

**کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است و با محدودیت شدید منابع آب مواجه است. از آنجا که بخش بسیار بزرگی از آب در دسترس به واسطه‌ی تبخیر-تعرق تلف می شود، برآورد دقیق آن حائز اهمیت می‌باشد. هدف از این تحقیق، مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، برنامه‌ریزی بیان ژن(GEP) و جنگل تصادفی (RF) در مدل‌سازی تبخیر-تعرق مرجع روزانه وتوزیع مکانی آن در استان زنجان است. برای این منظور از داده‌های هواشناسی ۱۰ساله (۱۳۹۸-۱۳۸۸) ایستگاه‌های سینوپتیک زنجان، ماه‌نشان، خدابنده و خرمدره استفاده شد. چهار پارامتر هواشناسی (میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خالص) به‌عنوان ورودی مدل‌ها و تبخیر-تعرق فائو پنمن مانتیث به‌عنوان خروجی مدل‌ها درنظر گرفته شد. برای مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین با یکدیگر، معیارهای ارزیابی محاسبه، نمودارهای سری زمانی، پراکنش و ویولونی رسم گردید. طبق نتایج به‌دست آمده در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه زنجان که مدل رگرسیون خطی چندگانه عملکرد خوبی داشت، مدل جنگل تصادفی دقت بالا و خطای کمتری در برآورد تبخیر-تعرق مرجع روزانه را دارد. سایر مدل‌ها نیز با داشتن دقت نزدیک به مدلRF، عملکرد قابل قبولی دارند. بنابراین از خروجی مدل RF جهت پهنه‌بندی تبخیر-تعرق مرجع روزانه استان زنجان به روش IDW در GIS استفاده گردید. نتایج نشان داد که در شمال غرب استان زنجان بر مقدار تبخیر-تعرق مرجع افزوده می شود که بیشترین مقدار آن در ایستگاه ماه‌نشان(٤/٣-٤) میلی‌متر بر روز است.**

**کلید واژه‌ها:** برنامه‌ریزی بیان ژن، تبخیر-تعرق مرجع، جنگل تصادفی، رگرسیون خطی چندگانه، سامانه اطلاعات جغرافیایی.

## مقدمه

فرآیند ترکیبی تبخیر آب از سطح زمین و تعرق از پوشش گیاهی دو فرآیند مهم جدایی ناپذیر چرخه هیدرولوژیکی هستند و در تلفات بارندگی سهم زیادی دارند(Sayyahi et al., 2021). یکی از رایج‌ترین روش‌های غیرمستقیم دربرآورد تبخیر-تعرق مرجع(Reference evapotranspiration - $ET_0$)، معادله‌ی فائو پنمن مانتیث می‌باشد. در این روش، پس از تعیین نیاز آبی گیاه مرجع، نیاز آبی گیاه موردنیاز بر اساس ضرایب گیاهی به دست می‌آید (Allen et al., 1998). روش مرجع فائو پنمن مانتیث به پارامترهای حداقل و حداکثر دمای هوا، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و... نیاز دارد. با این وجود، این متغیرهای هواشناسی در دسترس نبوده یا معمولاً غیرقابل اعتماد هستند (Almorox et al., 2015). تعداد زیاد داده‌ها در این روش با وجود دقت قابل قبول آن، همواره پژوهشگران را به سوی استفاده از روش‌های ساده‌تر و درعین حال دقیق‌تر سوق داده است بنابراین از مدل‌های گوناگونی برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌کنند و سعی در انتخاب مدلی با دقت بیشتر، خطا کمتر و درعین حال کمترین تعداد متغیر ورودی صورت می‌پذیرد. این مدل‌ها مشکلات و هزینه‌های روش‌های مستقیم را ندارند و می‌توان به‌منظور پیش‌بینی نیز از آن‌ها استفاده کرد، ازجمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های یادگیری ماشینی(Machine learning) اشاره کرد که علاوه بر در حیطه تخمین تبخیر-تعرق، بلکه در حیطه‌های دیگر علم هیدرولوژی پتانسیل بالایی را برای مدل‌سازی دارند(Malekahmadi et al., 2022).

Faloye et al. (2023) به مدل‌سازی تبخیر-تعرق محصول و کارایی مصرف آب ذرت با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) و مدل‌های رگرسیون خطی (Multiple Linear Regression) پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با استفاده از یک مدل ساده مانند MLR، بهره‌وری آب محصول را می‌توان با دقت در شرایط مختلف مدیریت خاک و آب پیش‌بینی کرد. Malekahmadi et al. (2022) کارایی برخی از روش های داده محور شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی و ترکیب

آن با تبدیل موجک (Wavelet- Artificial Neural Network)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Regression)، درخت تصمیم (Decision Tree) و رگرسیون خطی چند متغیره برای تخمین نرخ تبخیر–تعرق در ایستگاه اسکاتسبلوف در ایالت نبراسکا بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در این ایستگاه مدل WANN، عملکرد بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد و مدل‌های MLR و DT با داشتن دقت متوسط از سایر مدل‌ها ضعیف‌تر عمل کردند.

Ghourdoyee Milan et al. (2020) به شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر سه مدل به‌کار رفته با دقت قابل قبولی توانایی به شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی هستند. از بین مدل‌ها مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. Swain et al. (2017) مدل رگرسیون خطی چندگانه را برای تخمین بارش سالانه در منطقه کاتک هند استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خروجی داده‌های این مدل با ضریب تبیین بیشتر، دقت بالایی در تخمین بارش دارد. Allahverdipour و Sattari (2023) مقایسهٔ عملکرد روش‌های داده کاوی نوین و روش کلاسیک رگرسیون خطی چندگانه در پیشبینی بارش سالانه در شهر اهواز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش‌های تحلیل مؤلفه های اصلی و برنامه نویسی بیان ژن (Gene Expression Programming) نسبت به مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون خطی چندگانه عملکرد بهتر و دقت بیشتر در پیش‌بینی بارش سالانهٔ اهواز دارند. Mattar و Alazba (2019) به پیش‌بینی تبخیر–تعرق مرجع با دو روش MLR و GEP در مصر پرداختند. طبق نتایج پژوهش آن‌ها مدل GEP عملکرد بهتری از مدل MLR در مدل‌سازی تبخیر–تعرق مرجع دارد. Heramb et al. (2023) تبخیر–تعرق مرجع را در منطقه پانتاناگار به مدت ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین مدل‌سازی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل ANN و GEP دقت بالایی نسبت مدل MLR دارند. Mohammadrezapour (2017) برای پیش‌بینی تبخیر–تعرق پتانسیل ماهانه استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه ریزی ژنتیک و استنتاج فازی عصبی تطبیقی (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) پرداخت. ایشان نتیجه گرفتند که در مدل برنامه‌ریزی ژن الگوی متوسط دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در همان ماه دارای دقت بالاتری است. Maroufpour et al. (2017) به‌منظور براورد تبخیر–تعرق غرب و شمال غرب ایران، روش ترکیبی روش فائو پنمن– مانتیث را به‌عنوان مرجع در نظر گرفتند و تکنیک‌های یادگیری ماشین را مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر دقت بالای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی تبخیر–تعرق متوسط مرجع ماهانه می‌باشند. Kisi و Guven (2010) برای داده‌های کالیفرنیا ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای هواشناسی را انتخاب کردند و از برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی تبخیر–تعرق مرجع اقدام نموده‌اند. آن‌ها دریافتند که برنامه‌ریزی ژنتیک خطی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتری دارد.

Chen et al. (2020) به بررسی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مزرعه کلم پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در صورت کمبود داده‌های مشاهداتی می‌توان از مدل جنگل تصادفی (Random Forest) استفاده کرد. Poursalehi et al. (2022) عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی، مدل درخت تصمیم و شبکهٔ عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی آبخوان در دشت بیرجند را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی دقت بالایی در شبیه سازی تراز سطح ایستابی آبخوان دارد.

Siasar و Honar (2019) با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی، الگوریتم چاید (Chid) و ماشین بردار پشتیبان به برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه درشمال استان سیستان وبلوچستان اقدام کردند. طبق پژوهش آن‌ها مدل جنگل تصادفی با سناریو ورودی دمای حداکثر و حداقل، دمای میانگین، سرعت باد، رطوبت میانگین و تبخیر از تشت بیشترین دقت را دارد. Feng et al. (2017) ارزیابی جنگل‌های تصادفی و شبکه‌های عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (Generalized Regression Neural Networks) برای تخمین تبخیر تعرق مرجع روزانه برای جنوب غربی چین استفاده کردند و نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی عملکرد کمی بهتر از مدل شبکه عصبی رگرسیونی تعمیم یافته دارد. Fernández-Delgado et al. (2014) به طبقه‌بندی مدل‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که در بین طبقه بندی‌ها، مدل جنگل تصادفی بهترین است.

Rezaei et al. (2021) به برآورد و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل شمال شرق ایران با استفاده از روش فائو پنمن مونتیث پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که میزان تبخیر و تعرق روزهای سال به‌طور میانگین از ۰ تا ۶/۹ میلی‌متر در روز متغیر می‌باشد و بیشترین تبخیر وتعرق در ماه‌های جولای (۱۳۴/۴) میلی‌متر در ماه و کمترین تبخیر و تعرق در ماه ژانویه (۱۸/۷) میلی‌متر در ماه اتفاق افتاده است. پهنه‌بندی تبخیر تعرق پتانسیل نشان داد بیشترین تبخیر و تعرق در جنوب غربی محدوده مورد مطالعه (طبس) و کمترین آن مربوط به شمال شرق منطقه مورد مطالعه(قوچان و بجنورد) می‌باشد. Da Silva et al. (2019) از مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی تبخیر–تعرق مرجع و مقایسه دو روش زمین آماری کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) و وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse Distance Weighting) در شمال شرقی برزیل پرداختند. طبق نتایج پژوهش آن‌ها جنگل تصادفی دقت بیشتر و روش IDW زمان کمتری را در ایجاد درون یابی صرف می کند. Karami و Asadi (2016) به پهنه‌بندی

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45305.2103

تبخیر–تعرق مرجع پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش درون یابی IDW دقت بالایی دارد و میزان تبخیر–تعرق در قسمت‌های شمالی و شرقی دریاچه ارومیه بیشتر است. Sharghi et al. (2010) در ۲۹ ایستگاه کلیماتولوژی و سینوپتیک انتخاب شده در استان یزد به پهنه‌بندی تبخیر–تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانتیث پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که مناطق مرکزی، جنوبی و برخی نواحی غربی استان از شدت تبخیر–تعرق بیشتری نسبت به مناطق شمالی و شرقی برخوردار هستند.

در همین راستا، این پژوهش با هدف مدل‌سازی دقیق تبخیر–تعرق مرجع روزانه در استان زنجان با اقلیم خشک و نیمه‌خشک انجام گرفته است. با توجه به اهمیت برآورد دقیق تبخیر– تعرق در طراحی، برنامه ریزی و مدیریت سامانه‌های آبیاری، در این مطالعه از داده‌های ده ساله چهار ایستگاه هواشناسی و سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی برنامه‌ریزی بیان ژن و رگرسیون خطی چندگانه استفاده شده‌است تا عملکرد این روش‌ها در شرایط اقلیمی منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد. کلیه مدل‌ها با ورودی‌های یکسان شامل پارامترهای هواشناسی میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خالص آموزش داده شده و دقت آن‌ها در برآورد تبخیر– تعرق مرجع روزانه با استفاده از تحلیل‌های آماری و گرافیکی مقایسه شده است. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت تعداد ایستگاه‌های هواشناسی از سامانه اطلاعات جغرافیایی(Geographic Information System) جهت تخمین تبخیر–تعرق در نقاط فاقد داده و انجام پهنه بندی مکانی استفاده شد. بدین منظور، پس از شناسایی مدل برتر، نتایج آن برای برآورد تغییرات مکانی تبخیر– تعرق در سطح استان به کار گرفته شد؛ فرآیندی که تاکنون در این منطقه با چنین دقت و جامعیتی صورت نگرفته است. بهره گیری از مدل‌سازی پیشرفته و ارائه نقشه‌ی کاربردی، این پژوهش را به گامی نوآورانه در جهت بهینه‌سازی مدیریت منابع آب کشاورزی و تصمیم گیری‌های منطقه‌ای در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ مورد مطالعه

استان زنجان با بیش از ۲۲ هزار کیلومتر مربع مساحت، در منطقه شمال غرب ایران قرار گرفته است. محدوده جغرافیایی این استان ما بین ۳۵ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۱۰دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۶ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار دارد همچنین اقلیم غالب منطقه بر اساس طبقه بندی اقلیمی به روش دومارتن، نیمه خشک است. مرجع روزانه فائوپنمن‌مانتیث (FAO Penman Monteith-FPM) به‌عنوان پارامتر خروجی استفاده شد. مشخصات اقلیمی و مشخصات مکانی ایستگاه های مذکور در جدول (۱) و نقشه موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

**جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه های سینوپتیک استان زنجان**

**Table 1- Geographical characteristics of synoptic stations in Zanjan province**

| Station | Average Annual precipitation (mm) | Average $ET_0$ (mm/day) | Height (m) | Latitude (°N) | Longitude (°E) |
|---|---|---|---|---|---|
| Zanjan | 0.807 | 3.463 | 1659.4 | 36.6603 | 48.5217 |
| Mahneshan | 0.702 | 4.269 | 1284.5 | 36.74 | 47.6838 |
| Khodabande | 1.134 | 3.934 | 1887 | 36.1438 | 48.5891 |
| Khoramdare | 0.844 | 3.789 | 1575 | 36.1958 | 49.2108 |

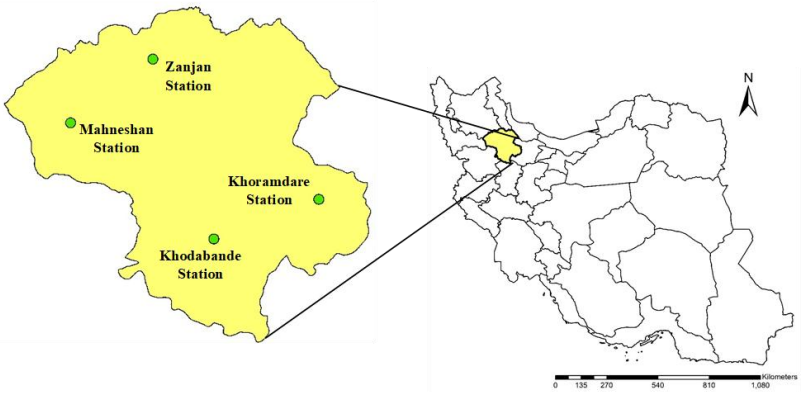



**Fig.1- Distribution of stations and the studied area**

**شکل ۱- پراکنش ایستگاه ها و منطقه مورد مطالعه**

**داده‌های مورد استفاده و روش تحقیق**

در تحقیق حاضر از ایستگاه‌های سینوپتیک زنجان، ماه‌نشان، خدابنده و خرمدره با پارامترهای هواشناسی میانگین دما $T_{mean}$ ($^0C$)، میانگین رطوبت نسبی $RH_{mean}$ (%)، سرعت باد $U_2$ (m.s-1)، تابش خالص $R_n$ (MJ.m-2.day-1) به‌صورت روزانه در بازه زمانی ۱۰ سال(۱۳۸۸-۱۳۹۸) به‌عنوان ورودی مدل‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندگانه(MLR)، برنامه‌ریزی بیان ژن(GEP) و جنگل تصادفی(RF) و تبخیر-تعرق مرجع روزانه فائو پنمن مانتیث($ET_0$-FPM) به عنوان روش استاندارد برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شد. برای بررسی میزان عملکرد مدل‌ها ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها برای صحت سنجی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از مدل‌های یادگیری ماشین با استفاده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا ، ضریب تعیین ، نمایه پراکندگی و شاخص ویلوت مقایسه و بهترین مدل انتخاب شد. علاوه بر شاخص‌های آماری از نمودارهای ارزیابی پراکنش و ویولونی برای مقایسه عملکرد مدل‌ها رسم گردید. با انتخاب بهترین مدل به پهنه بندی $ET_0$-Model پرداخته شد.

**مدل استاندارد فائو پنمن مونتیث (FAO56-PM)**

معادله مدل تجربی فائو پنمن مانتیث برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع روزانه و روش استاندارد ارزیابی دقت سایر مدل‌ها بر اساس رابطه (۱) است (Allen et al., 1998).

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T_{mean}+273}U_2(e_S-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \qquad (۱)$$

در رابطه اخیر، $ET_0$ تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی متر بر روز)، $\Delta$ شیب تابع فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، $R_n$ تابش خالص خورشیدی (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، G چگالی شار حرارتی خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، $\gamma$ ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، $T_{mean}$ متوسط دمای هوای (درجه سلسیوس)، $U_2$ متوسط سرعت باد در یک شبانه روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، $e_s$ فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) و $e_a$ نیز فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) می باشد. مقدار چگالی شار حرارتی خاک برای دوره های روزانه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

**رگرسیون خطی چندگانه(MLR)**

رگرسیون خطی چند متغیره یک روش آماری است که ارتباط دو یا چند متغیر مستقل با یک متغیره وابسته را بیان می‌کند (Yu et al., 2018). معادلهٔ (۲) رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده در این مطالعه است.

$$ET_{model}=a_0+a_1X_1+\cdots+a_kX_k+e \qquad (۲)$$

$ET_{model}$ متغیر وابسته، $X_1$ و $X_k$ متغیرهای مستقل، $a_0$ و $a_k$ ضرایب رگرسیون و e مقدار باقی‌مانده خطای رگرسیونی است که می‌توان صرف‌نظر کرد. رگرسیون خطی چند متغیره دارای روش‌های رگرسیون همزمان(Enter)، گام به گام(Stepwise)، پیشرونده (Forward) ، پسرونده (Backword) و حذفی (Remove) می‌باشد. در این پژوهش برای بکار بردن رگرسیون چند متغیره از SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) به روش هم‌زمان استفاده شده است.

**برنامه‌ریزی بیان ژن(GEP)**

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ مطرح شد که ترکیبی از روش‌های الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) و برنامه‌ریزی ژنتیک(Genetic Programming) است که در آن کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، شبیه به آن چه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اشکال و اندازه‌های مختلف، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ادغام می‌شوند. در این روش پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه ای از ترمینال‌ها و توابع مدل‌سازی می شود (Ferreira., 2001). در اجرای این مدل ، ابتدا بلوک‌های موجود نظیر پارامترهای ورودی، هدف و نیز تابع ارتباط دهنده آن‌ها می‌باشد، تعریف شده و سپس ساختار مناسب مدل و ضرایب آن مشخص می‌شوند. این روش دارای یک معادله ارتباط دهنده بین پارامترهای ورودی و خروجی بوده بنابراین توانایی انتخاب خودکار پارامترهای مناسب مدل و حذف پارامترهای غیر مرتبط است که این کار باعث کاهش ابعاد پارامتر های ورودی خواهد شد. از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن به‌طور گسترده در مدل‌سازی مسائل مربوط به تعیین ساختار پدیده‌ها به‌کار برده می‌شود (Borrelli et al., 2006). در تحقیق حاضر ۷۰ درصد داده‌ها (سال۱۳۸۸-۱۳۹۵) برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها (سال۱۳۹۶-۱۳۹۸) برای آزمون مدل درنظر گرفته شد و از نرم‌افزار GeneXproTools 4.0 برای مدل‌سازی $ET_0$ روزانه استفاده شد. در این تحقیق عملگرهای {-,+, $X^{1/3}$,$X^3$,$X^2$,Ln,exp,sqrt,/,*,} استفاده شدند. در جدول (۲) مشخصات پارامترهای برنامه‌ریزی ژنتیک به‌کار برده شده، ارائه گردیده است.

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45305.2103

**جدول ۲- مشخصات پارامترهای برنامه ریزی ژنتیک**

**Table 2- Genetic operators employed in implementing the GEP model**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Number of chromosomes | 30 | One point recombination rate | 0.3 |
| Head size | 8 | Two points recombination rate | 0.3 |
| Number of genes | 3 | Gene recombination rate | 0.1 |
| Linking function | + | Gene transposition rate | 0.1 |
| Fitness function | RMSE | Insertion sequence transposition rate | 0.1 |
| Mutation rate | 0.044 | Root insertion sequence | 0.1 |
| Inversion rate | 0.1 | | |

**جنگل تصادفی(RF)**

روش جنگل تصادفی را اولین بار Breiman (2001) با توسعه درخت‌های تصمیم، به‌عنوان یک روش جدید ارائه داده است که تخمین چندین الگوریتم منفرد را با هم با استفاده از قوانین مبتنی ترکیب می کند. این روش در بین روش‌های درختی، روش نسبتاً پیچیده ای است که به‌دلیل افزایش دقت مدل در آن چندین درخت تصمیم آموزش داده می‌شود. نتیجه حاصل تخمین گروهی از درختان تصمیم است. اصول کلی روش‌های آموزش گروهی بر اساس این فرض است که دقت آن‌ها از دیگر الگوریتم‌های آموزشی بیشتر است، چون ترکیبی از چند مدل تخمینی، دقیق‌تر از یک مدل می‌باشد و گروه‌ها توان مجموعه‌های منفرد و منحصر به فرد از طبقه‌ها را بیشتر می‌کنند، در حالی که هم‌زمان نقاط ضعف طبقه‌ها را کاهش می‌دهند (Kotsiantis and Pintelas, 2004). در روش جنگل تصادفی دو ویژگی n گره و m مشخصه به‌ترتیب برای تعداد درختان و تعداد متغیرهای کمکی مورد استفاده در هر زیر مجموعه است. تعداد متغیرها می‌تواند از یک تا تعداد کل متغیرهای کمکی را شامل شود. تعداد درختان توسط کاربر و معمولاً از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ انتخاب می گردد .CART (Classification And RegressionTree) یک الگوریتم درخت باینری در الگوریتم درخت تصمیم است و جنگل تصادفی مجموعه‌ای از درختانCART است و شامل چهار مرحله می‌باشد ( Wang et al 2018): ۱-نحوه انتخاب نمونه‌های مختلف بوت استرپ (Bootstropt) $X_j$ (j= تکرار بوت استرپ) به‌طور تصادفی از مجموعه داده اصلی X می باشد. دو سوم از نمونه‌ها در یک نمونه بوت استرپ و یک سوم از نمونه‌ها خارج از مجموعه جاگذاری می‌شود. هر درخت برای تطابق با یک زیر مجموعه خاصی از بوت استرپ ساخته می‌شود. ۲-در یک گره در هر درخت تقسیم جدید به طور تصادفی از همه شاخص‌ها و متغیر ورودی با کمترین میانگین مربع خطا به‌عنوان معیار تقسیم درخت رگرسیون انتخاب می‌شود. ۳-مراحل تقسیم داده‌ها در هر گره داخلی مطابق با مراحل بالا تا وقتی که تمام درختان تصادفی رشد کنند و شرایط توقف حاصل شود، تکرار می‌شود. ۴-در نهایت خروجی طبقه‌بندی براساس یک نتیجه میانگین، از پیش‌بینی‌های تمام درخت‌های منفرد آموزش دیده به‌دست می‌آید. برای مدل جنگل تصادفی از نرم‌افزار Statistica استفاده شد.

**پهنه بندی تبخیرتعرق-مرجع**

روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی بر اساس نقاط دارای پارامتر معین گزارش شده است که اغلب بر اساس درون‌یابی هستند که هدف از این روش‌ها تعمیم اطلاعات حاصل از نقاط به سطح می‌باشد. برای این منظور نقاط تعیین شده با فواصل مناسب روی نقشه استان مشخص شده و مقادیر پارامترهای اقلیمی در این نقاط اندازه‌گیری و به سایر قسمت‌ها، تعمیم داده شود ( Herrera et al., 2019). در روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای هرکدام از نقاط اندازه‌گیری شده، وزنی برطبق فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه‌ای که اندازه‌گیری نشده است، در نظر می‌گیرند. سپس توان وزندهی این وزن‌ها را کنترل می‌کند، به صورتی که توان‌های بزرگتر تأثیر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچکتر وزن‌ها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. البته باید درنظر گرفت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آن‌ها را به حساب می‌آورد، یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می‌باشند. مقدار عامل وزنی طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد (Sanjari, 2023):

$$X^{*}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{X_i}{D_i^{p}}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{D_i^{p}}} \qquad (۳)$$

که در آن:$X^{*}$ مقدار برآورد شده، $X_i$ مقدار متغیر مشاهداتی در ایستگاه i ام، $D_i$ فاصله بین نقطه مقدار مشاهداتی و مقدار برآورد شده، p توان وزن‌دهی و n تعداد نقاط مشاهداتی می‌باشد. برای پهنه بندی تبخیر-تعرق از روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) در ARC GIS 10.6 استفاده شد.

**شاخص های ارزیابی**

از چهار معیار ارزیابی شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ($R^2$)، نمایه پراکندگی(SI) و شاخص ویلوت (WI) جهت مقایسه مدل‌ها با یکدیگر و انتخاب بهترین مدل استفاده شد.

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(ET_m-ET_o)^2} \quad (۴)$$

$$R^2=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(ET_m-\overline{ET_m})(ET_o-\overline{ET_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(ET_m-\overline{ET_m})^2\sum_{i=1}^{n}(ET_o-\overline{ET_o})^2}}\right]^2 \quad (۵)$$

$$SI=\frac{RMSE}{\overline{ET_o}} \quad (۶)$$

$$WI=1-\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(ET_o-ET_m)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|ET_m-\overline{ET_o}|+|ET_o-\overline{ET_m}|)^2}\right) \quad (۷)$$

در روابط اخیر $ET_0$ و $ET_m$ به‌ترتیب مقادیر مدل استاندارد فائو پنمن مونتیث و تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط مدل ، $\overline{ET_0}$ و $\overline{ET_m}$ به‌ترتیب متوسط مقادیر مشاهداتی و مدل، n نمایانگر تعداد داده‌ها و i نیز گام زمانی مورد نظر می‌باشد. هر چه مقدار ضریب تعیین و شاخص ویلوت بیشتر و مقدار جذر میانگین مربعات خطا و نمایه پراکندگی کمتر باشد مدل دقت بیشتری در مدل‌سازی دارد.

علاوه بر ارزیابی‌های آماری از نمودارهای ارزیابی پراکنش و ویولونی برای مقایسه عملکرد مدل‌ها رسم گردید.

## نتایج و بحث

نتایج شاخص‌های آماری به‌دست آمده از مدل‌های یادگیری ماشین در جدول (۳) و روابط ریاضی به‌دست آمده از مدل GEP در جدول (۴) گزارش شده است. طبق جدول (۳)، مدل جنگل تصادفی در ایستگاه زنجان عملکرد خوبی با داشتن WI=0.99, SI=0.109, RMSE=0.373(mm/day), $R^2$=0.97 و عملکرد ضعیف در ایستگاه خرمدره با داشتن WI=0.988, SI=0.133, RMSE=0.496(mm/day), $R^2$=0.957 همچنین برای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در ایستگاه خدابنده با WI=0.966, SI=0.124, RMSE=0.478(mm/day), $R^2$=0.967 بهترین عملکرد و در ایستگاه خرمدره با WI=0.987, SI=0.14, RMSE=0.525(mm/day), $R^2$=0.953 ضعیف‌ترین عملکرد و برای مدل رگرسیون خطی چندگانه در ایستگاه زنجان با WI=0.955, SI=0.08, RMSE=0.276(mm/day), $R^2$=0.983 بهترین عملکرد و در ایستگاه خدابنده WI=0.987, SI=0.148, RMSE=0.572(mm/day), $R^2$=0.952 ضعیف‌ترین عملکرد را داراست. در تمامی ایستگاه ها به جز ایستگاه زنجان که مدل رگرسیون خطی چندگانه عملکرد خوبی داشت، مدل جنگل تصادفی دارای دقت بالا و خطای کمتری در برآورد تبخیر-تعرق مرجع روزانه می‌باشد. بعد از مدل جنگل تصادفی، مدل برنامه ریزی بیان ژن در ایستگاه‌های خدابنده و ماه‌نشان و مدل رگرسیون خطی چندگانه در ایستگاه‌های خرمدره در رتبه دوم قرار گرفتند.

**جدول ۳- نتایج آماری مدل های یادگیری ماشین در مدل‌سازی تبخیر-تعرق مرجع**

**Table 3- Statistical results of machine learning models in reference evapotranspiration modeling**

| Station Name | | Model | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | MLR | | GEP | | RF | |
| | | Test | Train | Test | Train | Test | Train |
| Khoramdare | WI | 0.988 | 0.988 | 0.987 | 0.987 | 0.988 | 0.991 |
| | SI | 0.137 | 0.136 | 0.14 | 0.136 | 0.133 | 0.113 |
| | RMSE (mm/day) | 0.513 | 0.501 | 0.525 | 0.523 | 0.496 | 0.431 |
| | $R^2$ | 0.955 | 0.956 | 0.953 | 0.951 | 0.957 | 0.968 |
| Kodabande | WI | 0.987 | 0.982 | 0.966 | 0.989 | 0.99 | 0.991 |
| | SI | 0.148 | 0.171 | 0.124 | 0.129 | 0.126 | 0.115 |
| | RMSE (mm/day) | 0.572 | 0.68 | 0.478 | 0.511 | 0.488 | 0.454 |
| | $R^2$ | 0.952 | 0.931 | 0.967 | 0.961 | 0.968 | 0.971 |
| Mahneshan | WI | 0.988 | 0.989 | 0.989 | 0.991 | 0.99 | 0.991 |
| | SI | 0.139 | 0.124 | 0.127 | 0.106 | 0.117 | 0.11 |
| | RMSE (mm/day) | 0.548 | 0.545 | 0.502 | 0.468 | 0.488 | 0.473 |
| | $R^2$ | 0.962 | 0.958 | 0.97 | 0.969 | 0.968 | 0.969 |
| Zanjan | WI | 0.955 | 0.992 | 0.997 | 0.987 | 0.991 | 0.993 |
| | SI | 0.08 | 0.103 | 0.144 | 0.134 | 0.109 | 0.096 |
| | RMSE (mm/day) | 0.276 | 0.357 | 0.499 | 0.463 | 0.373 | 0.335 |
| | $R^2$ | 0.983 | 0.97 | 0.955 | 0.951 | 0.97 | 0.9748 |

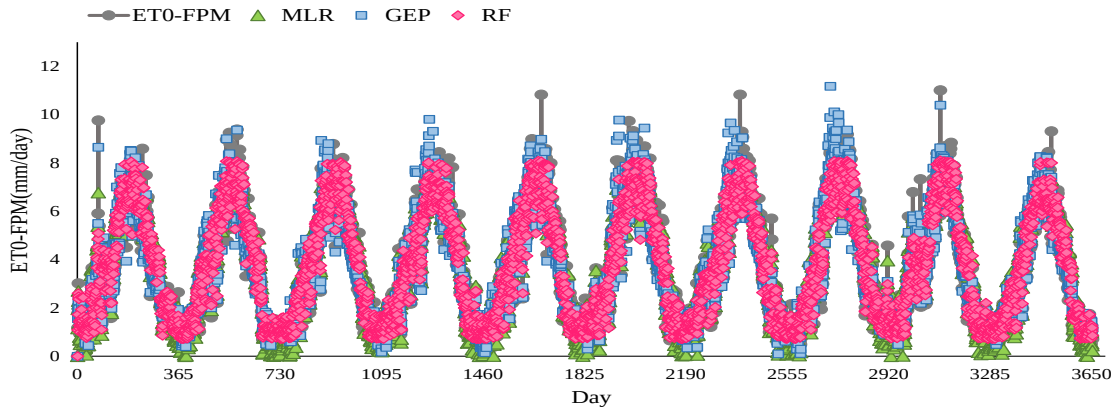
*DOI:* 10.22055/jise.2024.45305.2103

روند تغییرات تبخیر–تعرق مرجع روزانه مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های $ET_0$-FPM در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های $ET_0$ مدل جنگل تصادفی در مقایسه با مدل‌های GEP و MLR به داده‌های $ET_0$-FPM نزدیک تر است پس می‌توان دریافت که مدل جنگل تصادفی در برآورد تبخیر–تعرق مرجع روزانه از دقت بالایی برخوردار است. همچنین نحوه پراکنش مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و مقادیر مشاهداتی $ET_0$-FPM در شکل (۳) ارائه شده است. هر چقدر میزان پراکنش از خط نیمساز کمتر باشد، اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر $ET_0$-FPM کمتر بوده و دقت مدل بیشتر است. براساس شکل (۳) سایر مدل ها نیز با وجود داشتن نتایج قابل قبول، دقتی پایین‌تری نسبت به مدل جنگل تصادفی دارند. نمودار ویولونی که نمودار اصلاح شده و کامل تری از نمودار جعبه ای است در شکل (۴) رسم شده است. وضعیت پراکندگی داده ها نسبت به مقادیر بیشینه، کمینه و میانه برای مقادیر مشاهداتی و مدل‌ها ترسیم شده است. نزدیکترین نمودار ویولونی به داده‌های $ET_0$-FPM نمودار مدل جنگل تصادفی است. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Wu . et al (2020) مبنی بر مدل جنگل تصادفی در مناطق خشک که داده‌های هواشناسی محدود است در شبیه‌سازی تبخیر–تعرق عملکرد خوبی دارد، در یک راستا است. همچنین نتایج این مطالعه با نتایج Aiyelokun و Agbede (2021) که با استفاده از مدل جنگل تصادفی و با ترکیب چهار پارامتر حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به پیش‌بینی تبخیر–تعرق مرجع پرداختند و نشان دادند که این مدل با دقت بالا تبخیر–تعرق مرجع را مدل‌سازی می‌کند، مطابقت دارد.

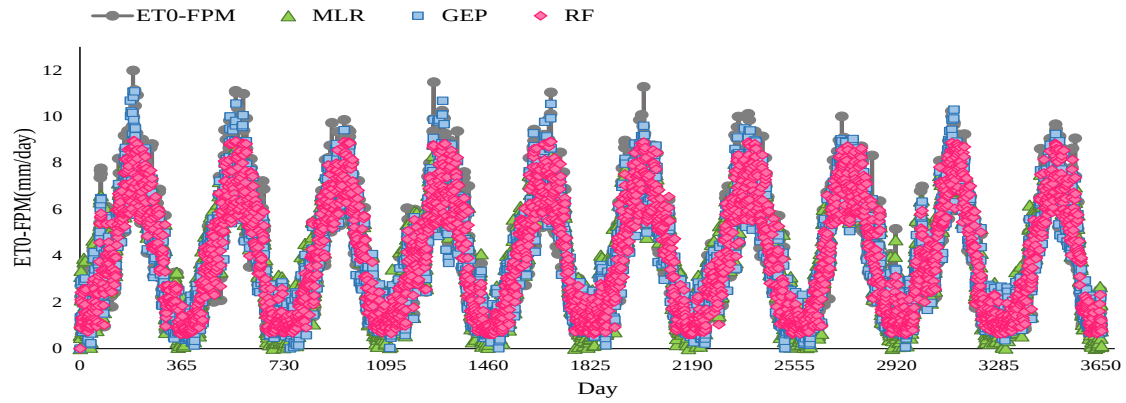
**جدول ٤- روابط ریاضی مدل GEP**

**Table 4- Mathematical expressions of GEP model**

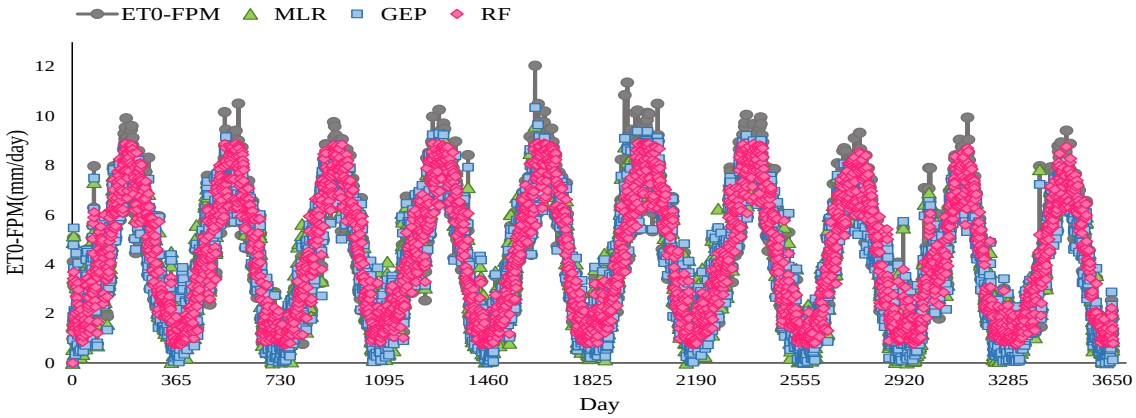
| Station Name | Mathematical expressions |
|---|---|
| Khoramdare | $\sqrt[3]{(R_n - T_{mean} - 7.9)^2} + \frac{(U_2+R_n)^2 - RH_{mean}}{RH_{mean}+R_n+4} + (0.19)^3$ |
| Khodabande | $\frac{\sqrt{R_n}^3}{RH_{mean}} - \frac{exp(U_2 - 4.75) + T_{mean}}{(R_n * U_2)3.42} + \frac{2U_2 + T_{mean} + 2.52}{23.14}$ |
| Mahneshan | $1\text{-}\log\left(\frac{RH_{mean}-U_2}{\sqrt[3]{U_2}}\right) + \left[\sqrt{R_n} - \log(U_2)\right]^3 + \sqrt{\sqrt{({T_{mean}}^2 * U_2)} + 5.44} + R_n$ |
| Zanjan | $\frac{((1.52 + U_2) * T_{mean} * \log(R_n))}{T_{mean} + RH_{mean} + 6.19} + \frac{U_2 - R_n - 6.86 - (RH_{mean} * R_n)}{U_2 * R_n * T_{mean} * RH_{mean}} + \sqrt{R_n}$ |



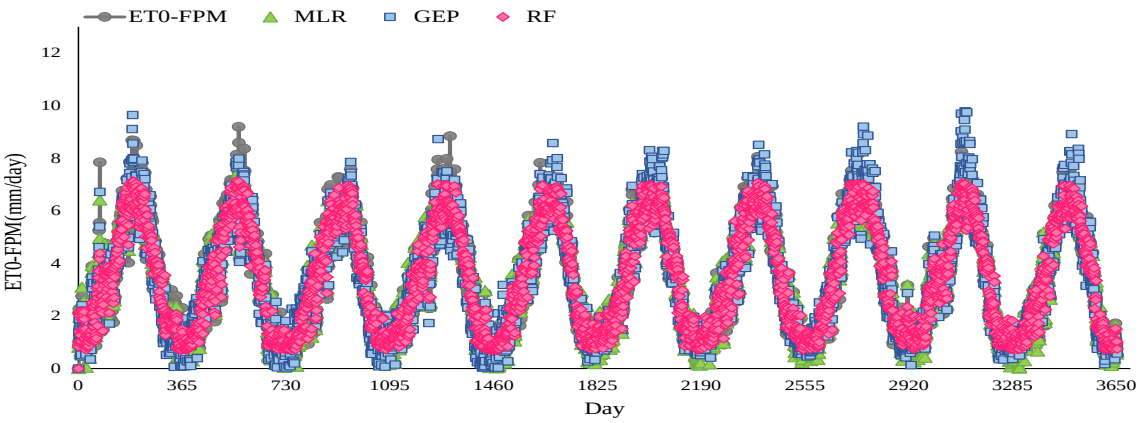

**A)**




**B)**




**C)**




**D)**

**Fig. 2- Trends in daily reference evapotranspiration changes resulting from machine learning models with $ET_0$-FPM data**

**A) Khoramdare B) Khodabande C) Mahneshan D) Zanjan**

**شکل ۲-روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع روزانه مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های $ET_0$-FPM**

**A) خرمدره B)خدابنده C)ماه‌نشان D)زنجان**

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45305.2103

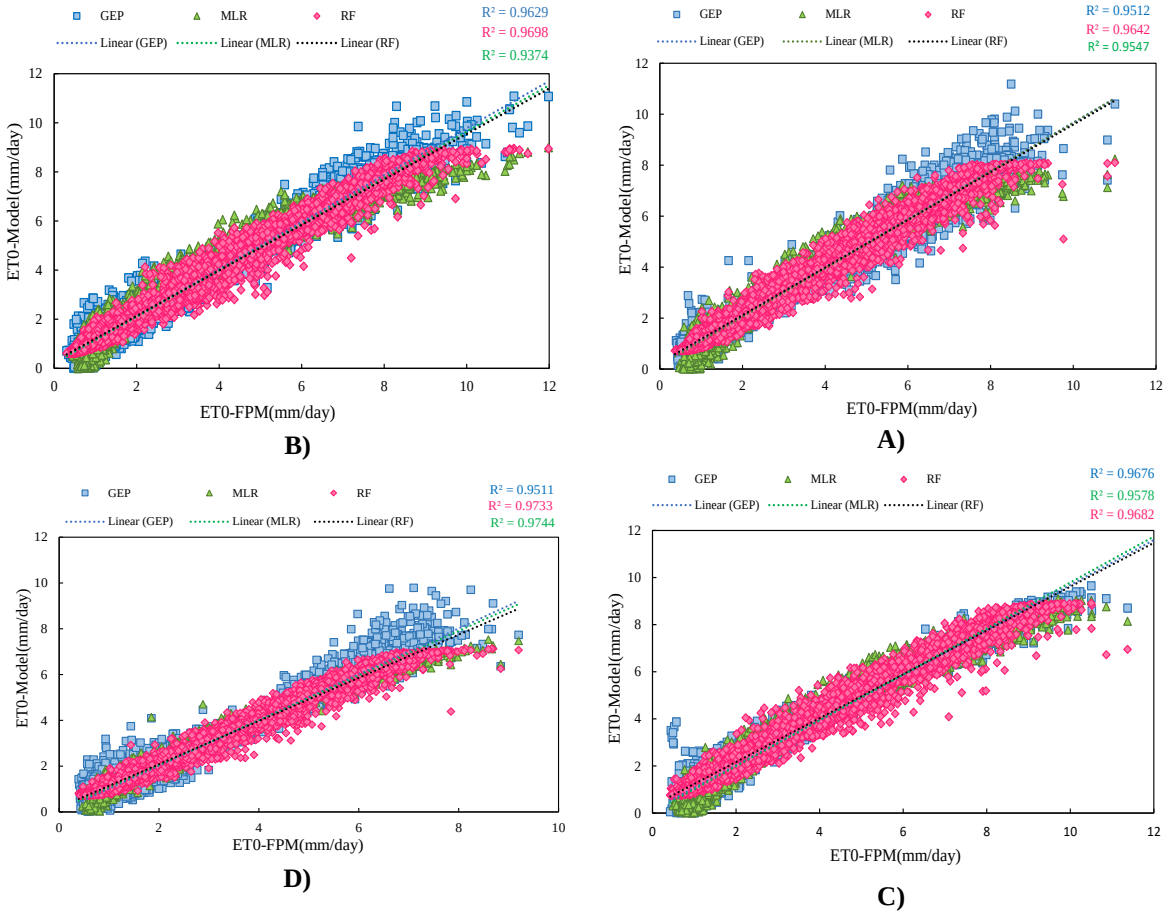
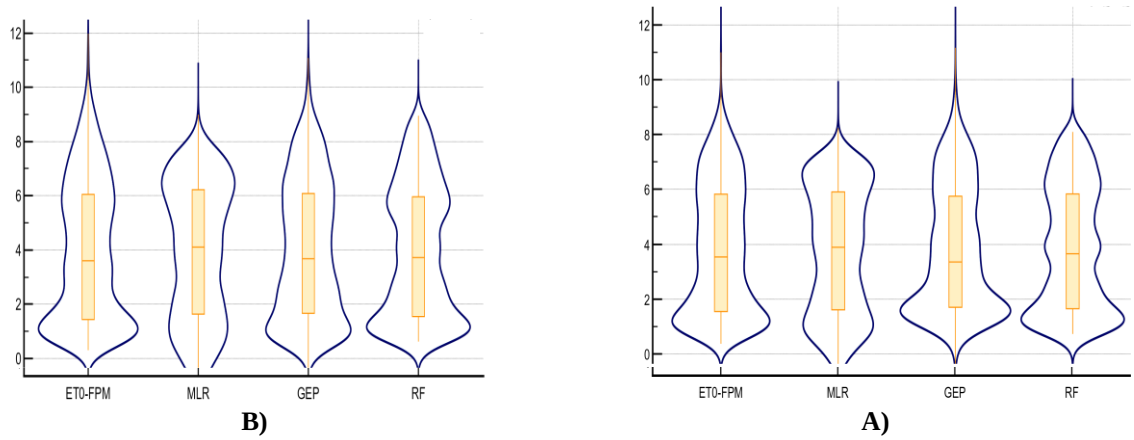



**Fig. 3- Distribition of predicted values by machine learning models and obseverd ET0-FPM values**
**A) Khoramdare B) Khodabande C) Mahneshan D) Zanjan**

**شکل ۳- پراکنش مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های یادگیری ماشین و مقادیر مشاهداتی $ET_0$-FPM**
**A) خرمدره B)خدابنده C)ماه‌نشان D)زنجان**



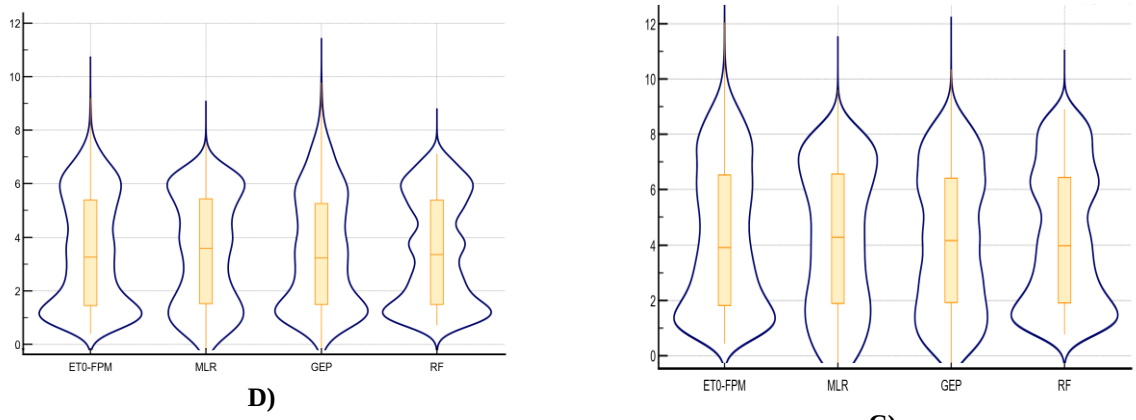



**Fig. 4- Violin chart of machine learning models and ET0-FPM**
**A) Khoramdare B) Khodabande C) Mahneshan D) Zanjan**
**شکل ٤- نمودار ویولونی مدل‌های یادگیری ماشین و ET0-FPM A)خرمدره B)خدابنده C)ماه‌نشان D)زنجان**

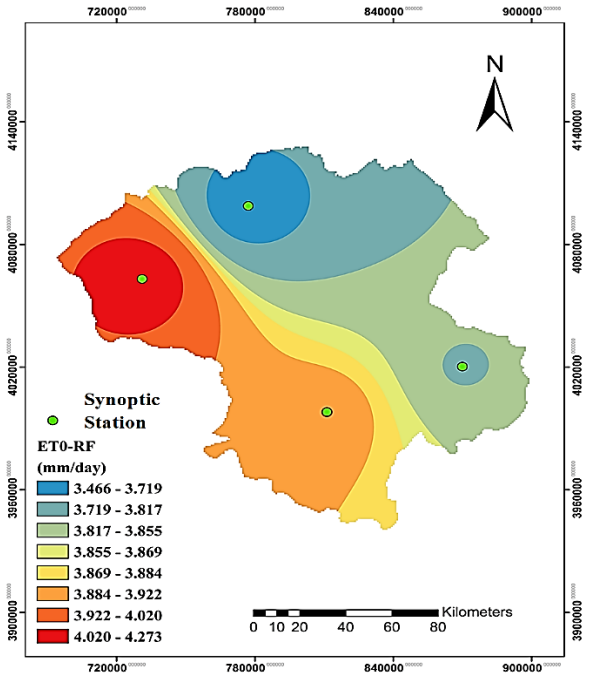



**Fig. 5- Zoning of $ET_0$ resulting from Random Forest model in Zanjan province**
**شکل ۵- پهنه‌بندی تبخیر-تعرق مرجع مدل جنگل تصادفی در استان زنجان**

با توجه به اینکه مدل جنگل تصادفی دارای دقت بالایی در پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع روزانه است، از مقادیر این مدل برای پهنه‌بندی تبخیر-تعرق به روش وزن‌دهی‌معکوس‌فاصله (IDW) استفاده شد. طبق شکل (۵)، تبخیر-تعرق مرجع در استان زنجان در بازه‌ی(۳/۴-۴/۲) میلی‌متر بر روز است. در مناطق شمال‌غرب این استان بر مقدار آن افزوده می‌شود و بیشترین مقدار آن در بازه‌ی(۴-۴/۳) میلی‌متر بر روز در ایستگاه ماه‌نشان است که مقدار بارش و شرایط اقلیمی بر میزان تبخیر-تعرق اثر گذار است. در نهایت نتایج این تحقیق با نتایج Da Silva et al. (2019) که روش IDW برای ایجاد نقشه توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع عملکرد خوبی دارد، در یک راستا است. به طور کلی از نتایج شکل‌ها می‌توان چنین استنباط کرد که مدل جنگل تصادفی عملکرد مناسبتری داشته است و می‌تواند مقدار تبخیر-تعرق روزانه منطقه مورد مطالعه را با استفاده از ورودی‌های منتخب با دقت نسبتا بالایی پیش‌بینی کند. همچنین نقشه ایجاد شده می‌تواند در حیطه مکانیابی بسیاری از پروژه‌های کشاورزی و منابع طبیعی و همچنین عمرانی در استان زنجان به عنوان یکی از نقشه‌های مهم مورد توجه قرار گیرد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پدیده تبخیر-تعرق مرجع در مطالعه‌های هیدرولوژیک و مدیریت بهینه منابع آبی، در تحقیق حاضر از

*DOI:* 10.22055/jise.2024.45305.2103

داده‌های سینوپتیک چهار ایستگاه استان زنجان به مدت ۱۰ سال شامل میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خالص به عنوان ورودی مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه(MLR)، برنامه‌ریزی بیان ژن(GEP) و جنگل تصادفی(RF)، برای تخمین تبخیر–تعرق مرجع روزانه استفاده گردید سپس مقادیر تخمینی به‌دست آمده از مدل‌ها با مقادیر روش فائو پنمن مانتیث مقایسه شدند. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری، نتایج نشان داد که هر سه مدل در تخمین تبخیر–تعرق مرجع روزانه از دقت بالا و خطای کمتری برخوردار هستند ولی مدل جنگل تصادفی(RF) با اختلاف کمی به‌عنوان مدل بهتر انتخاب شد نتایج حاصل از پهنه‌بندی به روش IDW این مدل نشان داد که در شمال‌غربی استان زنجان مخصوصا در ایستگاه ماه‌نشان مقدار تبخیر–تعرق بیشتر است.

## تشکر و قدردانی

از اداره هواشناسی کشور برای در اختیار قرار دادن داده‌های لازم برای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

**References**

1-Aiyelokun, O. O., and Agbede, O. A., 2021. Development of random forest model as decision support tool in water resources management of Ogun headwater catchments. *Applied Water Science*, 11, pp.1-9.

2- Allahverdipour, P. and Sattari, M.T., 2023. Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(2), pp.125-142. [In Persian]

3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), p.D05109.

4-Almorox, J., Quej, V.H. and Martí, P., 2015. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology*, *528*, pp.514-522.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057

5- Borrelli, A., De Falco, I., Della Cioppa, A., Nicodemi, M. and Trautteur, G., 2006. Performance of genetic programming to extract the trend in noisy data series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *370*(1), pp.104-108. Doi: 10.1016/j.physa.2006.04.025.

6- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, *45*, pp.5-32.

7- Chen, H., Huang, J.J. and McBean, E., 2020. Partitioning of daily evapotranspiration using a modified shuttleworth-wallace model, random Forest and support vector regression, for a cabbage farmland. *Agricultural Water Management*, *228*, p.105923.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105923

8- Da Silva Júnior, J. C., Medeiros, V., Garrozi, C., Montenegro, A., & Gonçalves, G. E. 2019. Random forest techniques for spatial interpolation of evapotranspiration data from Brazilian's Northeast. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105017. doi.org/10.1016/j.compag.2019.105017

9- Faloye, O.T., Ajayi, A.E., Babalola, T., Omotehinse, A.O., Adeyeri, O.E., Adabembe, B.A., Ogunrinde, A.T., Okunola, A. and Fashina, A., 2023. Modelling Crop Evapotranspiration and Water Use Efficiency of Maize Using Artificial Neural Network and Linear Regression Models in Biochar and Inorganic Fertilizer-Amended Soil under Varying Water Applications. *Water*, 15(12), p.2294. https://doi.org/10.3390/w15122294

10- Feng, Y., Cui, N., Gong, D., Zhang, Q. and Zhao, L., 2017. Evaluation of random forests and generalized regression neural networks for daily reference evapotranspiration modelling. *Agricultural Water Management*, *193*, pp.163-173. doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.003

11- Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S. and Amorim, D., 2014. Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems?. *The Journal of Machine Learning Research*, *15*(1), pp.3133-3181.

12- Ferreira, C., 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *arXiv preprint cs/0102027*.

13- Ghourdoyee Milan, S., Aryaazar, N., Javadi, S. and Razdar, B., 2020. Simulation of groundwater head using LS-SVM and comparison with ANN & MLR. *Hydrogeology*, *5*(1), pp.118-133. Doi.org/10.22034/HYDRO.2020.10455 (In Persian)

14- Heramb, P., Singh, P.K., Rao, K.R. and Subeesh, A., 2023. Modelling reference evapotranspiration using gene expression programming and artificial neural network at Pantnagar, India. *Information Processing in Agriculture*. doi.org/10.1016/j.inpa.2022.05.007

15- Herrera, S., Kotlarski, S., Soares, P.M., Cardoso, R.M., Jaczewski, A., Gutiérrez, J.M. and Maraun, D., 2019. Uncertainty in gridded precipitation products: Influence of station density, interpolation method and grid resolution. *International Journal of Climatology*, *39*(9), pp.3717-3729. doi.org/10.1002/joc.5878

16- Karami, M. and Asadi, M., 2016. Estimates and Zoning of reference evapotranspiration by FAO-Penman-Monteith (Case Study: North West of Iran). *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, *2*(1), pp.210-216.

17- Kisi, O. and Guven, A., 2010. Evapotranspiration modeling using linear genetic programming technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *136*(10), pp.715-723.

18- Kotsiantis, S. and Pintelas, P., 2004. Combining bagging and boosting. *International Journal of Computational Intelligence*, *1*(4), pp.324-333.

19-Malekahmadi, H., Mirzania, E., Khosravi, S., and Ebrahim Zadeh, A., 2022. Daily evapotranspiration modeling using regression and intelligent models (Case Study). *Iranian Water Research Journal*, 16(1), pp.49-62. Doi.org/ 10.22034/IWRJ.2022.10026.2338 [In Persian]

20- Maroufpour, S., Maroufpoor, E. and Sanikhani, H., 2017. Monthly Evapotranspiration Modeling in the Absence of Climatic Data Using the Soft Computing Methods in West and Northwest of Iran. *Water Resources Engineering*, *10*(34), pp.37-50. Dor: 20.1001.1.20086377.1396.10.34.4.4 [In Persian]

21- Mattar, M.A. and Alazba, A.A., 2019. GEP and MLR approaches for the prediction of reference evapotranspiration. *Neural Computing and Applications*, *31*, pp.5843-5855.doi.org/10.1007/s00521-018-3410-8.

22- Mohammadrezapour O., 2017. Monthly Forecast of Potential Evapotranspiration Models Using Support Vector Machine (SVM), Genetic programming and Neural - Fuzzy Inference System. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 7(3), pp.135-150. (In Persian).

23- Poursalehi, F., KhasheiSiuki, A. and Hashemi, S.R., 2022. Investigating the performance of random forest algorithm in predicting water table fluctuations Compared with two models of decision tree and artificial neural network (Case study: unconfined aquifer of Birjand plain). *Iranian Journal of Ecohydrology*, *8*(4), pp.961-974.Dio.org/ 10.22059/IJE.2022.327263.1526 (In Persian).

24- Rezaei, H., Habibi Nokhandan, M., Ghalhari, F. and Abbas, G., 2021. Estimation and mapping evapotranspiration using climatic parameters in GIS: A Case Study in Khorasan Province. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *4*(2), pp.115-127.Doi.org/ 10.22034/JMAS.2022.336879.1170 (In Persian).

25-Sanjari, S., 2023. ARC GIS application guide, *Mehrgan Qalam Publications*, 263. (In Persian).

26- Sayyahi, F., Farzin, S. and Karami, H., 2021. Forecasting daily and monthly reference evapotranspiration in the Aidoghmoush basin using multilayer perceptron coupled with water wave optimization. *Complexity*, *2021*, pp.1-12.doi.org/10.1155/2021/6683759

27- Sharghi, T., Bari Abarghuei, H., Asadi, M.A. and Kousari, M.R., 2010. Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province. *Journal of Arid Biome*, *1*(1), pp.25-33. Dor: 20.1001.1.2008790.1389.1.1.3.7 (In Persian).

28- Siasar, H. and Honar, T., 2019. Application of support vector machine, CHAID and random forest models, in estimated daily reference evapotranspiration in northern Sistan and Baluchestan Province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *13*(2), pp.378-388.Dor.org/ 20.1001.1.20087942.1398.13.2.10.8 (In Persian).

29- Swain, S., Patel, P. and Nandi, S., 2017, April. A multiple linear regression model for precipitation forecasting over Cuttack district, Odisha, India. In *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 355-357). IEEE.doi.org/ 10.1109/I2CT.2017.8226150

30- Wang, X., Liu, T., Zheng, X., Peng, H., Xin, J. and Zhang, B., 2018. Short-term prediction of groundwater level using improved random forest regression with a combination of random features. *Applied Water Science*, *8*, pp.1-12. doi.org/10.1007/s13201-018-0742-6

31- Wu, M., Feng, Q., Wen, X., Deo, R.C., Yin, Z., Yang, L. and Sheng, D., 2020. Random forest predictive model development with uncertainty analysis capability for the estimation of evapotranspiration in an arid oasis region. *Hydrology Research*, *51*(4), pp.648-665.doi.org/10.2166/nh.2020.012

32- Yu, H., Wen, X., Feng, Q., Deo, R.C., Si, J. and Wu, M., 2018. Comparative study of hybrid-wavelet artificial intelligence models for monthly groundwater depth forecasting in extreme arid regions, Northwest China. *Water Resources Management*, *32*, pp.301-323. doi.org/10.1007/s11269-017-1811-6

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 93-112**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**Research Paper**

**EXTENDED ABSTRACT**

# Revealing climatic changes in reference evapotranspiration in Kermanshah province using the water requirement system

M. Jovzi[1*], N. A. Ebrahimi Pak[2] and S. N. Hosseini[3]

*1*- Corresponding Author, Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. (m.jovzi@areeo.ac.ir)*
*2- Associated Professor, Irrigation Research Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.*
*3- Researcher, Irrigation Research Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research and Education Organization (AREEO), Karaj, Iran*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 12 December 2023
Revised: 24 April 2024
Accepted: 27 April 2024

*Keywords:*
Climate change, Kermanshah, Penman Monteith, Pettitt's test, Revealing, Water requirements.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Jovzi, M., Ebrahimi Pak, N. A., Hosseini, S. N. (2025). 'Revealing climatic changes in reference evapotranspiration in Kermanshah province using the water requirement system', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 93-112. doi: 10.22055/jise.2024.45541.2107.

## Introduction

Reference evapotranspiration, as one of the important components of the hydrologic cycle, is an important factor in field irrigation planning, drought assessment and climate change (Li et al., 2017)**.** Reference evapotranspiration represents the maximum amount of water transferred from the land surface to the atmosphere (Yang et al., 2020). Determining this parameter is the first step in estimating the water requirements of plants and irrigation water management (Yassen et al., 2020). Research on temporal and spatial changes of reference evapotranspiration is very important in order to understand climate change and its effects on hydrologic processes and water resources (Liu and Zhang, 2013). Knowledge of reference evapotranspiration change trends can help agricultural irrigation management and support decision makers involved in water resources management in the future (Yang et al., 2020). In many regions with a shortage of water resources, such as Kermanshah province, the study of reference evapotranspiration changes can help to understand the spatial distribution and temporal changes of water. The purpose of this research is to determine the temporal variations of reference evapotranspiration and the factors affecting it in 10 synoptic meteorological stations of Kermanshah province**.** The information obtained from this research can provide guidance for agricultural water requirements, irrigation planning and sustainable water resource management under climate change conditions.

## Methodology

The study area is Kermanshah province. This province is located in the geographical coordinates of 33° 41′ to 35° 17′N and 45° 25′ to 48° 6′E. The area of this province is 2.44 million hectares, which is about 1.5% of the total area of Iran. Its average height is 1200 meters above sea level. The

meteorological data used include minimum and maximum temperature, average temperature, minimum and maximum relative humidity, wind speed, net radiation input to the surface, and daylight hours in the statistical period of 1999 to 2022**.** The water requirement system of plants which is the result of the Penman Monteith method of FAO was used to determine the reference evapotranspiration. This reference evapotranspiration estimation method is proposed in FAO publication No. 56 as the best method compared to other reference evapotranspiration estimation methods (Sumner and Jacobs, 2005). Pettitt's test of XLSTAT software was used to determine the possible changes in reference evapotranspiration and climatic factors affecting it. Pettitt's test was first presented by Pettitt (Pettitt, 1979). Pettitt's test is a non-parametric test that does not require any assumptions about the data distribution. This test is an adaptation of the Mann-Whitney test, which allows identifying the time in which the change occurs.

**Results and Discussion**

The results of Pettitt's test for reference evapotranspiration in the synoptic meteorological stations of Kermanshah province are shown in Table (1). In Table (1), when the p-value is < 0.05, Pettitt's test is significant at the 5% probability level and indicates the sudden changes of reference evapotranspiration in the investigated time series. The results of Table (1) showed that the changes of monthly and annual reference evapotranspiration time series were significant in 42 and 60% of the studied stations, respectively, at the 5% probability level and indicated the existence of a sudden change in these variables.

**Table 1-The results of Pettitt's test for reference evapotranspiration in synoptic meteorological stations of Kermanshah province**

| Station | Pettitt's test statistics | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Feb | Mar | Annual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eslamabad-e- | $K_t$ | 40 | 49 | 85 | 91 | 104 | 97 | 110 | 81 | 66 | 83 | 95 | 26 | 110 |
| Gharb | p-value | 0.74 | 0.51 | 0.045$^{*}$ | 0.02$^{*}$ | 0.01* | 0.01$^{*}$ | 0.00$^{**}$ | 0.07 | 0.20 | 0.052 | 0.02$^{*}$ | 0.98 | 0.00$^{**}$ |
| Kermanshah | $K_t$ | 40 | 47 | 65 | 118 | 105 | 143 | 112 | 89 | 86 | 105 | 99 | 32 | 129 |
| | p-value | 0.74 | 0.56 | 0.21 | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.03$^{*}$ | 0.04$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.91 | 0.00$^{**}$ |
| Sarpol Zahab | $K_t$ | 38 | 30 | 42 | 52 | 70 | 54 | 66 | 49 | 40 | 41 | 36 | 37 | 58 |
| | p-value | 0.79 | 0.94 | 0.70 | 0.45 | 0.15 | 0.40 | 0.19 | 0.52 | 0.75 | 0.72 | 0.84 | 0.82 | 0.33 |
| Sonqor | $K_t$ | 48 | 47 | 52 | 73 | 69 | 62 | 52 | 65 | 58 | 71 | 59 | 46 | 84 |
| | p-value | 0.55 | 0.57 | 0.45 | 0.12 | 0.17 | 0.25 | 0.45 | 0.21 | 0.32 | 0.14 | 0.31 | 0.59 | 0.05 |
| Qasr-e-Shirin | $K_t$ | 89 | 94 | 96 | 35 | 69 | 71 | 103 | 56 | 44 | 63 | 44 | 58 | 72 |
| | p-value | 0.03$^{*}$ | 0.02$^{*}$ | 0.02$^{*}$ | 0.86 | 0.16 | 0.13 | 0.01$^{*}$ | 0.37 | 0.64 | 0.25 | 0.64 | 0.33 | 0.12 |
| Kangavar | $K_t$ | 43 | 65 | 50 | 45 | 48 | 44 | 48 | 71 | 34 | 93 | 69 | 39 | 41 |
| | p-value | 0.66 | 0.21 | 0.50 | 0.62 | 0.55 | 0.64 | 0.54 | 0.14 | 0.88 | 0.02$^{*}$ | 0.17 | 0.78 | 0.72 |
| Gilan Gharb | $K_t$ | 91 | 99 | 97 | 105 | 101 | 100 | 91 | 110 | 108 | 108 | 107 | 90 | 99 |
| | p-value | 0.03$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.02$^{*}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.01$^{*}$ | 0.03$^{*}$ | 0.01$^{*}$ |
| Javanrud | $K_t$ | 37 | 43 | 73 | 100 | 110 | 94 | 99 | 71 | 73 | 38 | 59 | 61 | 86 |
| | p-value | 0.82 | 0.66 | 0.12 | 0.01$^{*}$ | 0.00$^{**}$ | 0.02$^{*}$ | 0.01$^{*}$ | 0.14 | 0.12 | 0.79 | 0.30 | 0.27 | 0.04$^{*}$ |
| Harsin | $K_t$ | 121 | 111 | 117 | 117 | 131 | 117 | 40 | 63 | 66 | 45 | 87 | 96 | 135 |
| | p-value | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.74 | 0.24 | 0.20 | 0.61 | 0.04$^{*}$ | 0.02$^{*}$ | 0.00$^{**}$ |
| Ravansar | $K_t$ | 50 | 80 | 116 | 107 | 115 | 88 | 116 | 86 | 68 | 65 | 41 | 92 | 124 |
| | p-value | 0.50 | 0.07 | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.00$^{**}$ | 0.04$^{*}$ | 0.00$^{**}$ | 0.04$^{*}$ | 0.17 | 0.21 | 0.72 | 0.02$^{*}$ | 0.00$^{**}$ |

Notes: $^{*}$ and $^{**}$ indicate significant difference at a 5% probability level (P < 0.05), and significant difference at a 1% probability level (P < 0.01), respectively.

The year and amount of reference evapotranspiration change in the synoptic meteorological stations of Kermanshah province are presented in Table (2). The results of Table (2) showed that the meteorological station of Gilan Gharb had sudden incremental changes in reference evapotranspiration in all months of the year. Eslamabad-e-Gharb, Kermanshah, Gilan Gharb, Javanrud and Hersin stations had sudden incremental changes in annual reference evapotranspiration. Gilan Gharb station had the highest amount of this change with 429 mm. In order to find the reason for the biggest increase in annual reference evapotranspiration at Gilan Gharb station, the time series of each of the parameters

affecting the annual reference evapotranspiration was investigated by Pettitt's test. The results showed that although the maximum annual temperature had a sudden decrease, but with an increase in the average minimum annual temperature, wind speed, daylight hours and net radiation, and a decrease in the maximum relative humidity, the reference evapotranspiration increased in this station. The research results of Fu et al. (2022) in China showed that the increase in temperature and wind speed and the decrease in relative humidity had positive and large effects on the increase in evapotranspiration, which agrees with the results of the present study. Ravansar station had a sudden decrease in evapotranspiration of annual reference amounting to 183 mm. In order to find the reason for the reduction of annual reference evapotranspiration at Ravansar station, the time series of each of the parameters affecting the annual reference evapotranspiration was investigated by Pettitt's test. The results showed that although the average temperature, minimum temperature and maximum annual temperature had a sudden increase, but with the increase in the average maximum relative humidity and the decrease in wind speed and annual daylight hours, the annual reference evapotranspiration in this station decreased**.** In the study of Jhajharia et al. (2012) also pointed out the contradiction of increasing temperature while reducing evapotranspiration. The research results of Liu and Zhang (2013) showed that a significant reduction in wind speed dominates the change of reference evapotranspiration and neutralizes the effect of increasing air temperature that increases the reference evapotranspiration and leads to its reduction. This result agrees with the findings of the present study.

**Table 2-The year and value of reference evapotranspiration change (mm) in synoptic meteorological stations of Kermanshah province**

| Station | Parameter | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Feb | Mar | Annual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eslamabad-e-Gharb | Year of change | - | - | 2005 | 2003 | 2014 | 2015 | 2014 | - | - | - | 2011 | - | 2014 |
| | Value | - | - | 22.4 | 46.9 | 31.3 | 30.8 | 23 | - | - | - | 8.4 | - | 164 |
| Kermanshah | Year of change | - | - | - | 2012 | 2011 | 2011 | 2012 | 2015 | 2012 | 2007 | 2011 | - | 2011 |
| | Value | - | - | - | 22.4 | 18.5 | 18.7 | 17.5 | 16.3 | 6.3 | 8.3 | 9.6 | - | 142 |
| Sarpol Zahab | Year of change | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Value | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sonqor | Year of change | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Value | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Qasr-e-Shirin | Year of change | 2007 | 2004 | 2004 | - | - | - | 2013 | - | - | - | - | - | - |
| | Value | 23.9 | 29.3 | 46.1 | - | - | - | -20.5 | - | - | - | - | - | - |
| Kangavar | Year of change | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2007 | - | - | - |
| | Value | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 6.9 | - | - | - |
| Gilan Gharb | Year of change | 2007 | 2005 | 2005 | 2005 | 2005 | 2006 | 2005 | 2006 | 2004 | 2004 | 2005 | 2004 | 2005 |
| | Value | 28.4 | 40.4 | 63.4 | 39.4 | 57.9 | 53.6 | 41.5 | 28.8 | 31.5 | 22.9 | 16.7 | 20.5 | 429 |
| Javanrud | Year of change | - | - | - | 2006 | 2006 | 2006 | 2013 | - | - | - | - | - | 2006 |
| | Value | - | - | - | 31.7 | 32.5 | 23.7 | -15.8 | - | - | - | - | - | 104 |
| Harsin | Year of change | 2007 | 2011 | 2007 | 2007 | 2007 | 2007 | - | - | - | - | 2007 | 2006 | 2007 |
| | Value | 27.1 | 29 | 36.5 | 45.7 | 54.7 | 28.2 | - | - | - | - | 9.9 | 12.7 | 243 |
| Ravansar | Year of change | - | - | 2010 | 2009 | 2009 | 2008 | 2008 | 2008 | - | - | - | 2010 | 2008 |
| | Value | - | - | -31.4 | -28.4 | -32.1 | -19.9 | -16.1 | -13.1 | - | - | - | -9 | -183 |

## Conclusions

The results of this study show that, in general, from 2003 to 2015, sudden incremental changes in reference evapotranspiration and have occurred in most meteorological stations of Kermanshah province. Sudden incremental changes in reference evapotranspiration indicate an increase in the water requirement of plants. Therefore, water resources should be providing to the agricultural sector with a more appropriate planning, and the farmers, considering the amount of evapotranspiration, should act with better planning regarding the crop selection.

**Acknowledgments**

The authors of this article express their appreciation and gratitude to the officials of the Water Requirement System of Plants (NIAZAB), Soil and Water Research Institute (SWRI), and the I.R. of Iran Meteorological Organization (IRIMO) for their cooperation and providing the data needed for this study.

**References**

1- Fu, J., Gong, Y., Zheng, W., Zou, J., Zhang, M., Zhang, Z., Qin, J., et al., 2022. Spatial-temporal variations of terrestrial evapotranspiration across China from 2000 to 2019. *Science of The Total Environment, 825,* p. 153951. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153951.

2- Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Singh, V.P. and Fakheri-Fard, A., 2012. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes, 26(3),* pp. 421–435. doi: 10.1002/hyp.8140.

3- Li, Y., Yao, N. and Chau, H.W., 2017. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment, 592,* pp. 680–692. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.196.

4- Liu, X. and Zhang, D., 2013. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature. *Hydrological Processes, 27(26),* pp. 3941–3948. doi: 10.1002/hyp.9527.

5- Pettitt, A.N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics, 28(2),* pp. 126–135. doi: 10.2307/2346729.

6- Sumner, D.M. and Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology, 308(1–4),* pp. 81–104. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.023.

7- Yang, L., Feng, Q., Adamowski, J.F., Yin, Z., Wen, X., Wu, M., Jia, B., et al., 2020. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in northwest China based on CORDEX-EA. *Atmospheric Research, 238,* p. 104868. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104868.

8- Yassen, A.N., Nam, W. H. and Hong, E. M., 2020. Impact of climate change on reference evapotranspiration in Egypt. *CATENA, 194,* p. 104711. doi: 10.1016/j.catena.2020.104711.



© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۱۱۲-۹۳

# آشکارسازی تغییرات اقلیمی در تبخیر تعرق مرجع در استان کرمانشاه با استفاده از سامانه نیاز آب

مهدی جوزی[1*]، نیاز علی ابراهیمی پاک[2] و سید نرگس حسینی[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران. (m.jovzi@areeo.ac.ir)

۲- دانشیار، بخش تحقیقات آبیاری، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳- محقق، بخش تحقیقات آبیاری، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

## چکیده

**تغییرات اقلیمی که در سالیان اخیر رخ داده است ایجاب می‌کند که تأثیر آن بر تبخیر تعرق مرجع به‌عنوان یک عامل مهم در تعیین نیاز آبی گیاهان مورد بررسی قرار گیرد. هدف از انجام این پژوهش تعیین تغییرات زمانی تبخیر تعرق مرجع و عوامل مؤثر بر آن در ۱۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه می‌باشد. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل حداقل و حداکثر دما، میانگین دما، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خالص ورودی به سطح و ساعات آفتابی در دوره آماری ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۱ می‌باشد. برای تعیین تبخیر تعرق مرجع از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور که منتج از روش پنمن مونتیث فائو است استفاده شد. برای تعیین تغییرات احتمالی تبخیر تعرق مرجع و عوامل اقلیمی مؤثر بر آن از آزمون پتیت نرم‌افزار XLSTAT استفاده شد. نتایج نشان داد متغیرهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع در حال تغییر هستند. همچنین تغییرات سری‌های زمانی تبخیر تعرق مرجع ماهانه و سالانه به‌ترتیب در ۴۲ و ۶۰ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده‌ی وجود تغییر ناگهانی این متغیرها بود. ایستگاه هواشناسی گیلانغرب در همه ماه‌های سال دارای تغییرات ناگهانی افزایشی تبخیر تعرق مرجع بود. در مقیاس سالانه نیز ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود و هرسین دچار این تغییر شدند به‌طوری‌که ایستگاه گیلانغرب با ۴۲۹ میلی‌متر داری بیشترین مقدار آن بود. تغییرات افزایشی تبخیر تعرق مرجع نشان‌دهنده‌ی افزایش نیاز آبی گیاهان است. لذا می‌بایست منابع آبی را با برنامه‌ریزی مناسب‌تر در اختیار بخش کشاورزی قرار داد.**

**کلیدواژه‌ها:** آشکارسازی، آزمون پتیت، پنمن مونتیث، تغییر اقلیم، کرمانشاه، نیاز آبی.

## مقدمه

کشور ایران به‌عنوان یک منطقه خشک و نیمه خشک، حدود ۹۰ درصد از کل منابع آبی را در بخش کشاورزی مصرف می‌کند. بنابراین تغییرات اقلیمی ممکن است بر نیاز آبی کشاورزی تأثیر بگذارد، زیرا تبخیر تعرق ممکن است تحت تأثیر تغییرات متغیرهای هواشناسی مانند دما، تابش خورشید، سرعت باد و رطوبت نسبی قرار گیرد (Eslamian et al., 2011). متوسط شرایط آب و هوایی در یک منطقه جغرافیایی به‌عنوان اقلیم آن منطقه توصیف می‌گردد و تغییر معنی‌دار متوسط داده‌های هواشناسی در یک دوره زمانی معین نیز به‌عنوان تغییر اقلیم شناخته می‌شود (Maunder, 1995). تبخیر تعرق مهم‌ترین عنصر اقلیمی است که بر تعادل آب و بهره‌وری گیاه تأثیرگذار است (Fisher et al., 2011). در دهه‌های گذشته، تغییرات چشم‌گیر اقلیمی (شامل متغیرهای اصلی هواشناسی) فرآیندهای هیدرولوژیک را در بسیاری از مناطق تغییر داده است. این امر در حال حاضر منجر به یک سری مشکلات منابع آبی در برخی از مناطق به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است (Xu et al., 2015). آگاهی از روند تغییرات تبخیرتعرق مرجع می‌تواند به مدیریت آبیاری کشاورزی کمک کند و از تصمیم‌گیرندگانی که در بخش مدیریت منابع آب درگیر هستند در آینده حمایت کند (Yang et al., 2020). تبخیر تعرق تأثیر زیادی بر سایر فرآیندهای هیدرولوژیک مرتبط مانند حرکت رطوبت خاک، تخلیه آب‌های زیرزمینی و تولید رواناب دارد (Liang et al., 2010). بنابر این درک توزیع مکانی و تغییرات زمانی تبخیر تعرق یک موضوع مهم در مطالعات هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز می‌باشد (Xu et al., 2015).

تبخیر تعرق یکی از اجزای مهم چرخه هیدرولوژیک است که نیازهای جوی و شرایط سطح را ادغام می‌کند. تبخیر تعرق مطابق نشریه ۵۶ فائو (FAO) از حاصل‌ضرب ضریب گیاهی هر گیاه در تبخیر تعرق مرجع به‌دست می‌آید (Allen et al., 1998). تبخیر تعرق مرجع نشان‌دهنده‌ی حداکثر مقدار آب منتقل شده از سطح زمین به جو است (Yang et al., 2020). تعیین این عامل اولین گام در برآورد نیاز آبی گیاهان و مدیریت آب آبیاری است (Yassen et al., 2020). این عامل یک عامل مهم در برنامه‌ریزی آبیاری مزرعه، ارزیابی خشک‌سالی و تحقیقات تغییرات اقلیمی است (Li

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107

et al., 2017). پژوهش در مورد تغییرات زمانی و مکانی تبخیر و تعرق مرجع به‌منظور درک تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر فرآیندهای هیدرولوژیک و منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار است (Liu and Zhang, 2013).

در بسیاری از مناطق با کمبود منابع آب، مانند استان کرمانشاه، مطالعه تغییرات تبخیر تعرق مرجع می‌تواند به درک توزیع مکانی و تغییرات زمانی آب کمک کند. در این راستا در سال‌های گذشته مطالعه تغییرات زمانی تبخیر تعرق مرجع مورد توجه محققین مختلفی از دنیا قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به Li et al. (2017) در چین، Yang et al. (2020) در شمال‌غربی چین، Yassen et al. (2020) در مصر، de Oliveira et al. (2021) در برزیل، Ahmadi et al. (2022) در آمریکا، Fu et al. (2022) در چین، Di Nunno و Granata (2023) در ایتالیا و Rahman et al. (2023) در بنگلادش اشاره کرد. در ایران نیز مطالعه Dinpazhoh و Foroughi (2018) در شمال‌غرب ایران نشان داد که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه تغییرات تبخیر تعرق مرجع سالانه به‌طور ناگهانی افزایش یافته است. آن‌ها دلیل این افزایش را افزایش دمای هوا یا سرعت باد یا ترکیبی از این دو عامل عنوان کردند. در مطالعه آن‌ها تغییرات زمانی تبخیر تعرق مرجع فقط در برخی از ایستگاه‌های استان کرمانشاه تا سال ۲۰۱۵ میلادی مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهشی Dinpazhoh et al. (2019) حساسیت تبخیر تعرق مرجع به تغییر عوامل هواشناسی را در شمال‌غرب و غرب ایران بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد بیشترین تأثیر در نوسانات تبخیر تعرق مرجع مربوط به دمای حداقل و حداکثر می‌باشد. طی مطالعه‌ای Ebrahimi Haftcheshmeh و Farhadi Bansouleh (2021) در استان کرمانشاه تغییرات مکانی تبخیر تعرق مرجع را پهنه‌بندی کردند اما به تغییرات زمانی آن اشاره‌ای نداشتند. در مطالعه‌ای Jovzi et al. (2023) نیز ضمن پهنه‌بندی تغییرات مکانی تبخیر تعرق مرجع در استان کرمانشاه، تبخیر تعرق مرجع را از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور تعیین و با روش‌های تعیین تبخیر تعرق مرجع هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاکی از دقت بالای این سامانه در تعیین تبخیر تعرق مرجع بود. مطالعه‌های مختلف دیگری در رابطه با تبخیر تعرق مرجع در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعه‌های Zare Abyaneh (2012) Mirmousavi et al.، Akhvan et al. (2014)، Ghamarnia et al. (2015)، Haghizadeh et al. (2019) و Haghizadeh et al. (2019) اشاره کرد اما در هیچکدام از این مطالعه‌ها تغییرات ناگهانی سری زمانی تبخیر تعرق مرجع بررسی نشده است.

لذا بررسی منابع نشان داد تا کنون پژوهشی که نشان دهنده تغییرات زمانی تبخیر تعرق مرجع و تغییرات اقلیمی مؤثر بر آن در همه ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه که دارای آمار بلند مدت هواشناسی باشد؛ صورت نگرفته است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش تعیین تغییرات زمانی تبخیر تعرق مرجع و عوامل مؤثر بر آن در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه می‌باشد. اطلاعات به دست‌آمده از این پژوهش می‌تواند راهنمایی برای نیاز آبی کشاورزی، برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب پایدار تحت شرایط تغییرات اقلیمی ارائه دهد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان کرمانشاه می‌باشد. این استان در مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. مساحت آن ۲/۴۴ میلیون هکتار می‌باشد که حدود ۱/۵ درصد مساحت کل کشور را در بر دارد. ارتفاع متوسط آن ۱۲۰۰ متر از سطح دریا است. این استان از جنوب به استان‌های ایلام و لرستان، از شمال به کردستان، از غرب به کشور عراق و از شرق به استان همدان متصل می‌باشد. این استان ۱۴ شهرستان دارد که شامل: پاوه، اسلام‌آباد غرب، جوانرود، ثلاث باباجانی، دالاهو، سرپل زهاب، روانسر، صحنه، سنقر، قصرشیرین، کنگاور، کرمانشاه، هرسین و گیلانغرب است (شکل ۱).

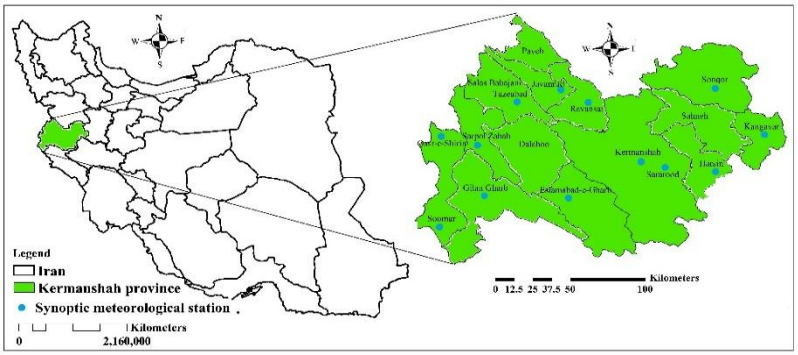



**Fig. 1- Location of Kermanshah province and synoptic meteorological stations**

**شکل ۱- موقعیت استان کرمانشاه و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک**

### داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی استفاده شده در این پژوهش شامل حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دما، حداقل رطوبت نسبی، حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خالص ورودی به سطح و ساعات آفتابی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک منتخب استان کرمانشاه براساس دوره آماری ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۱ می‌باشد. در جدول (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه استان کرمانشاه ارائه شده است.

### تبخیر تعرق مرجع

به‌منظور تعیین تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور استفاده شد (Soil and Water Research Institute, 2023). تبخیر تعرق مرجع در این سامانه توسط روش پنمن مونتیث فائو محاسبه می‌شود. این روش برآورد تبخیر تعرق مرجع در نشریه ۵۶ فائو به‌عنوان بهترین روش در مقایسه با سایر روش‌های برآورد تبخیر تعرق مرجع پیشنهاد شده است (Sumner and Jacobs, 2005). تبخیر تعرق مرجع از روش پنمن مونتیث فائو با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta\,(R_n-G) + \gamma \frac{900}{T+273}\,U_2(e_s-e_a)}{\Delta + \gamma\,(1+0.34\,U_2)} \qquad (۱)$$

که در آن، $R_n$ تابش خالص ورودی به سطح ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، $T$ میانگین روزانه دمای هوا ($^oC$)، $e_a$ فشار بخار واقعی ($kPa$)، $e_s$ فشار بخار اشباع ($kPa$)، $U_2$ میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m\ s^{-1}$)، $\gamma$ ضریب ثابت سایکرومتری ($kPa\ ^oC^{-1}$)، $ET_o$ تبخیر تعرق مرجع ($mm\ day^{-1}$) و $\Delta$ شیب منحنی فشار بخار ($kPa\ ^oC^{-1}$) است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta = \frac{2504\exp[17.27T \div (T+237.3)]}{(T+237.3)^2} \qquad (۲)$$

### تحلیل آماری

برای تعیین احتمال تغییرات در تبخیر تعرق مرجع و عوامل اقلیمی مؤثر بر آن در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه از آزمون پتیت (Pettitt test) در نرم‌افزار XLSTAT استفاده شد. آزمون پتیت اولین بار توسط پتیت ارائه شد (Pettitt, 1979). آزمون پتیت یک آزمون ناپارامتریک است که به هیچ فرضی در مورد توزیع داده‌ها نیاز ندارد. این آزمون اقتباسی از آزمون من-ویتنی (Mann-Whitney) است که امکان شناسایی زمانی را که در آن تغییر اتفاق می‌افتد را می‌دهد. در آزمون پتیت فرض صفر: دنباله ($x_1, x_2, \ldots, x_n$) دارای نقطه تغییر نمی‌باشد و فرض مخالف می‌گوید که: دنباله ذکر شده دارای نقطه تغییر می‌باشد. در این آزمون سری زمانی $x_i$ به دو زیر سری $x_1, x_2, \ldots, x_t$ و $x_{t+1}, x_{t+2}, \ldots, x_n$ دسته‌بندی شده و با آماره $U_{t,n}$ دو زیر سری ذکر شده را از لحاظ یکسان بودن توزیع هر کدام با توزیع آماری سری زمانی $x_i$ آزمون می‌کند. برای انجام آزمون پتیت آماره $U_{t,n}$ ($1\le t<n$) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^{t}\sum_{i=t+1}^{n} D_{ij} \qquad (۳)$$

که در آن مقادیر $D_{ij}$ برای هر $i$ و $j$ (بین ۱ تا $n$) با توجه به شرایط زیر محاسبه می‌شود. اگر $(x_i-x_j)>0$ باشد آنگاه $D_{ij} = -1$، اگر $(x_i-x_j)=0$ باشد آنگاه $D_{ij} = 0$ و اگر $(x_i-x_j)<0$ باشد آنگاه $D_{ij} = 1$ قرار داده می‌شود.

در آزمون پتیت آماره $K_t$ که از رابطه زیر محاسبه می‌شود نقطه تغییر $1\le t<n$ را در صورت وجود ارائه می‌کند.

$$K_t = \max_{1\le t<n} |U_{t,n}| \qquad (۴)$$

برای تعیین معنی‌دار بودن این آزمون از مقدار آماره $p$ استفاده می‌شود. در صورتی‌که مقدار $p$ از ۰/۰۵ کوچکتر باشد آنگاه فرض صفر آزمون پتیت در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد خواهد شد.

$$p = \exp\left(\frac{-6K_t^2}{t^3+t^2}\right) \qquad (۵)$$

## نتایج و بحث

به منظور تعیین تغییرات تبخیر تعرق مرجع ماهانه و سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه از آزمون پتیت استفاده شد که نتایج این آزمون در جدول (۲) ارائه شده است. در جدول (۲) هنگامی‌که $p\text{-value} < 0.05$ باشد آزمون پتیت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده‌ی تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع در سری زمانی مورد بررسی می‌باشد. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد آزمون پتیت در ۴۲ درصد از سری‌های زمانی تبخیر تعرق مرجع ماهانه در ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده‌ی وجود تغییر ناگهانی در تبخیر تعرق مرجع ماهانه در ایستگاه‌های مربوطه می‌باشد. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه هواشناسی گیلانغرب در همه ماه‌های سال دارای تغییرات ناگهانی در تبخیر تعرق مرجع ماهانه بود. ضمن آن‌که ایستگاه‌های هواشناسی سرپل ذهاب و سنقر در هیچ‌یک از ماه‌های سال دارای تغییرات ناگهانی در تبخیر تعرق مرجع نبودند. هم‌چنین نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد آزمون پتیت در ۶۰ درصد از سری‌های زمانی تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده‌ی وجود تغییر ناگهانی در تبخیر تعرق مرجع سالانه این ایستگاه‌ها (اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود، هرسین و روانسر) می‌باشد.

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107

**جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه استان کرمانشاه**

**Table 1- Geographical coordinates of studied synoptic meteorological stations in Kermanshah province**

| Station | Latitude (°N) | Longitude (°E) | Elevation (m) | Statistical period | Climate type* |
|---|---|---|---|---|---|
| Eslamabad-e-Gharb | 34.12 | 46.47 | 1350 | 1378-1401 | Semi-arid, cold |
| Kermanshah | 34.35 | 47.15 | 1320 | 1378-1401 | Semi-arid, cold |
| Sarpol Zahab | 34.45 | 45.87 | 545 | 1378-1401 | Semi-arid, moderate |
| Sonqor | 34.78 | 47.58 | 1700 | 1378-1401 | Semi-arid, cold |
| Qasr-e-Shirin | 34.53 | 45.6 | 376 | 1378-1401 | Semi-arid, warm |
| Kangavar | 34.5 | 47.98 | 1470 | 1378-1401 | Semi-arid, cold |
| Gilan Gharb | 34.13 | 45.93 | 816 | 1378-1401 | Semi-arid, moderate |
| Javanrud | 34.77 | 46.5 | 1375 | 1378-1401 | Mediterranean, cold |
| Harsin | 34.27 | 47.55 | 1580 | 1378-1401 | Semi-arid, cold |
| Ravansar | 34.72 | 46.65 | 1380 | 1378-1401 | Mediterranean, cold |

Notes: *: Climate type from Modified De Martonne method (de Martonne, 1926).

**جدول ۲- نتایج آزمون پتیت برای تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه**

**Table 2- The results of Pettitt's test for reference evapotranspiration in synoptic meteorological stations of Kermanshah province**

| Station | Pettitt's test statistics | Farvardin | Ordibehesht | Khordad | Tir | Mordad | Shahrivar | Mehr | Aban | Azar | Day | Bahman | Esfand | Annual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eslamabad-e-Gharb | $K_t$ | 40 | 49 | 85 | 91 | 104 | 97 | 110 | 81 | 66 | 83 | 95 | 26 | 110 |
| | p-value | 0.74 | 0.51 | 0.045* | 0.02* | 0.01* | 0.01* | 0.00** | 0.07 | 0.20 | 0.052 | 0.02* | 0.98 | 0.00** |
| Kermanshah | $K_t$ | 40 | 47 | 65 | 118 | 105 | 143 | 112 | 89 | 86 | 105 | 99 | 32 | 129 |
| | p-value | 0.74 | 0.56 | 0.21 | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.03* | 0.04* | 0.01* | 0.01* | 0.91 | 0.00** |
| Sarpol Zahab | $K_t$ | 38 | 30 | 42 | 52 | 70 | 54 | 66 | 49 | 40 | 41 | 36 | 37 | 58 |
| | p-value | 0.79 | 0.94 | 0.70 | 0.45 | 0.15 | 0.40 | 0.19 | 0.52 | 0.75 | 0.72 | 0.84 | 0.82 | 0.33 |
| Sonqor | $K_t$ | 48 | 47 | 52 | 73 | 69 | 62 | 52 | 65 | 58 | 71 | 59 | 46 | 84 |
| | p-value | 0.55 | 0.57 | 0.45 | 0.12 | 0.17 | 0.25 | 0.45 | 0.21 | 0.32 | 0.14 | 0.31 | 0.59 | 0.05 |
| Qasr-e-Shirin | $K_t$ | 89 | 94 | 96 | 35 | 69 | 71 | 103 | 56 | 44 | 63 | 44 | 58 | 72 |
| | p-value | 0.03* | 0.02* | 0.02* | 0.86 | 0.16 | 0.13 | 0.01* | 0.37 | 0.64 | 0.25 | 0.64 | 0.33 | 0.12 |
| Kangavar | $K_t$ | 43 | 65 | 50 | 45 | 48 | 44 | 48 | 71 | 34 | 93 | 69 | 39 | 41 |
| | p-value | 0.66 | 0.21 | 0.50 | 0.62 | 0.55 | 0.64 | 0.54 | 0.14 | 0.88 | 0.02* | 0.17 | 0.78 | 0.72 |
| Gilan Gharb | $K_t$ | 91 | 99 | 97 | 105 | 101 | 100 | 91 | 110 | 108 | 108 | 107 | 90 | 99 |
| | p-value | 0.03* | 0.01* | 0.01* | 0.01* | 0.01* | 0.01* | 0.02* | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.01* | 0.03* | 0.01* |
| Javanrud | $K_t$ | 37 | 43 | 73 | 100 | 110 | 94 | 99 | 71 | 73 | 38 | 59 | 61 | 86 |
| | p-value | 0.82 | 0.66 | 0.12 | 0.01* | 0.00** | 0.02* | 0.01* | 0.14 | 0.12 | 0.79 | 0.30 | 0.27 | 0.04* |
| Harsin | $K_t$ | 121 | 111 | 117 | 117 | 131 | 117 | 40 | 63 | 66 | 45 | 87 | 96 | 135 |
| | p-value | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.74 | 0.24 | 0.20 | 0.61 | 0.04* | 0.02* | 0.00** |
| Ravansar | $K_t$ | 50 | 80 | 116 | 107 | 115 | 88 | 116 | 86 | 68 | 65 | 41 | 92 | 124 |
| | p-value | 0.50 | 0.07 | 0.00** | 0.00** | 0.00** | 0.04* | 0.00** | 0.04* | 0.17 | 0.21 | 0.72 | 0.02* | 0.00** |

Notes: * and ** indicate significant difference at a 5% probability level ($P < 0.05$), and significant difference at a 1% probability level ($P < 0.01$), respectively.

نتایج نشان می‌دهد هرچند که ایستگاه‌های هواشناسی قصر شیرین و کنگاور دارای تغییر ناگهانی در تبخیر تعرق مرجع سالانه نیستند اما در برخی از ماه‌های سال مانند دی در کنگاور و فروردین، اردیبهشت، خرداد و مهر در قصر شیرین دارای تغییرات ناگهانی می‌باشند. مطالعه Tabari et al. (2011) در نیمه غربی ایران نیز حاکی از تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع در ۷۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است که با یافته‌های این پژوهش در مورد تغییرات ناگهانی این پارامتر در ایستگاه‌های استان کرمانشاه مطابقت دارد.

در شکل‌های (۲) تا (۵) تبخیر تعرق مرجع ماهانه در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، کنگاور، قصر شیرین، گیلانغرب، جوانرود، هرسین و روانسر که دارای تغییرات ناگهانی بودند نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب (ماه‌های خرداد تا مهر و بهمن)، کرمانشاه (تیر تا بهمن)، قصرشیرین (فروردین تا خرداد)، کنگاور (دی)، گیلانغرب (فروردین تا اسفند)، جوانرود (تیر تا شهریور) و هرسین (فروردین تا شهریور، بهمن و اسفند) تبخیر تعرق مرجع ماهانه دارای تغییر ناگهانی افزایشی می‌باشد. اما در ایستگاه‌های قصر شیرین (مهر ماه)، جوانرود (مهر ماه) و روانسر (خرداد تا آبان و اسفند) تبخیر تعرق مرجع ماهانه دارای تغییر ناگهانی کاهشی است. این امر نشان می‌دهد در یک ایستگاه مشخص ممکن است در برخی از ماه‌های سال، تغییرات تبخیر تعرق مرجع افزایشی و در برخی از آن‌ها کاهشی باشد. همچنین تغییرات تبخیر تعرق مرجع ماهانه در بین ایستگاه‌های مورد بررسی همواره افزایشی نبوده بلکه در برخی از آن‌ها کاهشی می‌باشد.




**Fig. 2- Sudden monthly ETo changes in Eslamabad-e-Gharb, Kermanshah and Kangavar stations**

**شکل ۲- تغییرات ناگهانی ETo ماهانه در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور**

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107




**Fig. 3- Sudden monthly ETo changes in Qasr-e-Shirin and Gilan Gharb stations**

**شکل ۳- تغییرات ناگهانی ETo ماهانه در ایستگاه‌های قصر شیرین و گیلانغرب**




**Fig. 4- Sudden monthly ETo changes in Gilan Gharb (Esfand), Javanrud, Harsin and Ravansar (Khordad and Tir) stations**

**شکل ٤- تغییرات ناگهانی ETo ماهانه در ایستگاه‌های گیلانغرب (اسفند)، جوانرود، هرسین و روانسر (خرداد و تیر)**

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107

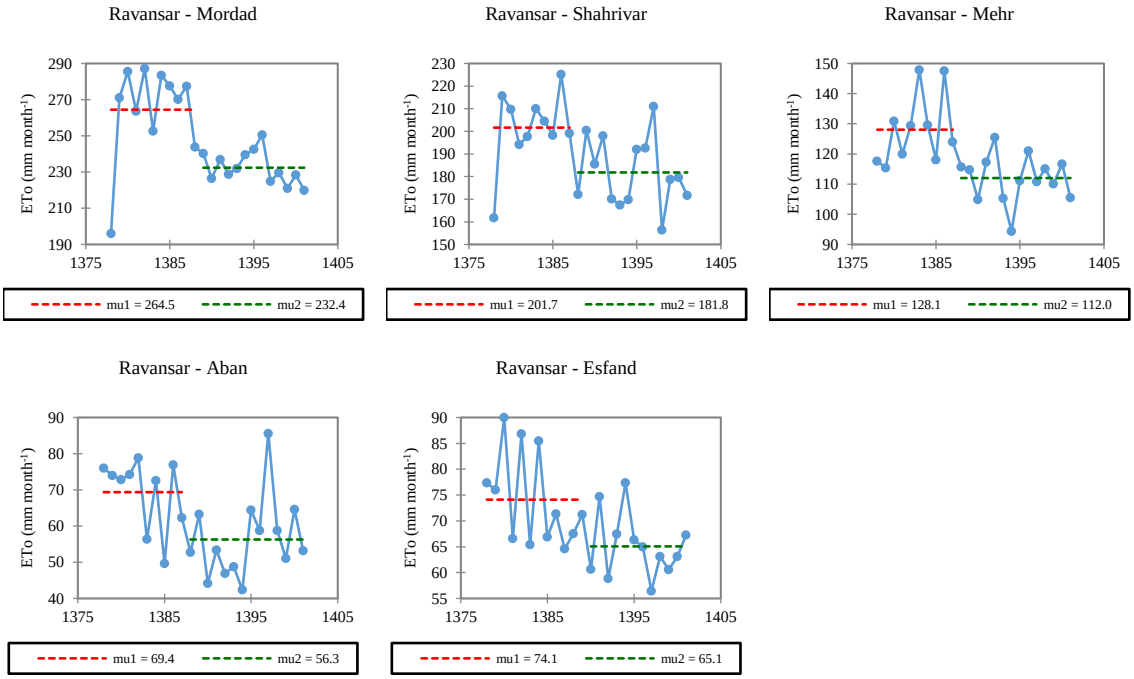



**Fig. 5- Sudden monthly ETo changes in Ravansar station**
**شکل ۵- تغییرات ناگهانی ETo ماهانه در ایستگاه روانسر**

در شکل (۶) تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود، هرسین و روانسر که دارای تغییرات ناگهانی بودند نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود و هرسین تبخیر تعرق مرجع سالانه دارای تغییر ناگهانی افزایشی می‌باشد. اما در ایستگاه روانسر تبخیر تعرق مرجع سالانه دارای تغییر ناگهانی کاهشی است. این امر نشان می‌دهد تغییرات تبخیر تعرق مرجع سالانه در بین ایستگاه‌های مورد بررسی برخلاف انتظار همواره افزایشی نبوده بلکه ممکن است کاهشی نیز باشد. نتایج مطالعه Dinpazhoh و Foroughi (2018) در شمال غرب ایران نیز نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه تغییرات تبخیر تعرق مرجع سالانه افزایشی می‌باشد. آن‌ها دلیل این افزایش را افزایش دمای هوا یا سرعت باد یا ترکیبی از این دو عامل عنوان کردند. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه (سهند و پارس آباد) تغییرات تبخیر تعرق مرجع سالانه کاهشی بوده است. نتایج ایشان با نتایج پژوهش حاضر که در برخی ایستگاه‌ها تغییرات تبخیر تعرق مرجع افزایشی و در برخی از آن‌ها کاهشی است، هم‌خوانی دارد. تحقیقات Tabari et al. (2011) نشان داد تبخیر تعرق مرجع در ۷۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه در غرب ایران دارای تغییرات ناگهانی افزایشی است که با یافته‌های این پژوهش در ایستگاه‌های استان کرمانشاه همخوانی دارد. مطالعه Rahman et al. (2023) در بنگلادش نیز نشان داد که تبخیر تعرق مرجع سالانه دارای تغییرات کاهشی می‌باشد که با نتایج این مطالعه در مورد کاهشی بودن این عامل در ایستگاه روانسر هم‌راستا است. نتایج مطالعه‌ها در برخی از مناطق چین و آمریکا نشان داد افزایش دما در همه موارد نمی‌تواند مسئول افزایش تبخیر تعرق مرجع باشد بلکه کاهش در تشعشعات خورشیدی ناشی از افزایش پوشش ابر می‌تواند منجر به کاهش این عامل گردد (Peterson et al., 1995; Yin et al., 2010).

مقدار تغییر تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار تفاوت میانگین تبخیر تعرق مرجع قبل و بعد از سال تغییر (۱۳۸۶) در ماه فروردین در ایستگاه‌های قصر شیرین، گیلانغرب و هرسین به‌ترتیب ۲۳/۹، ۲۸/۴، ۲۷/۱ میلی‌متر بود. مقدار این تفاوت در ماه اردیبهشت برای ایستگاه‌های ذکر شده به‌ترتیب ۲۹/۳ (۱۳۸۳)، ۴۰/۴ (۱۳۸۴) و ۲۹/۰ (۱۳۹۰) میلی‌متر شد. لازم به ذکر است که اعداد داخل پرانتز مربوط به سال تغییر ناگهانی تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد نظر می‌باشد. مقدار تفاوت میانگین تبخیر تعرق مرجع قبل و بعد از سال تغییر در ماه خرداد در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، قصر شیرین، گیلانغرب، هرسین و روانسر به‌ترتیب ۲۲/۴ (۱۳۸۴)، ۴۶/۱ (۱۳۸۳)، ۶۳/۴ (۱۳۸۴) ۳۶/۵ (۱۳۸۶) و ۳۱/۴- (۱۳۹۰) میلی‌متر بود. لازم به ذکر است که عدد منفی نشان دهنده مقدار کاهش میانگین تبخیر تعرق مرجع بعد از سال وقوع تغییر ناگهانی در ایستگاه مربوطه است.

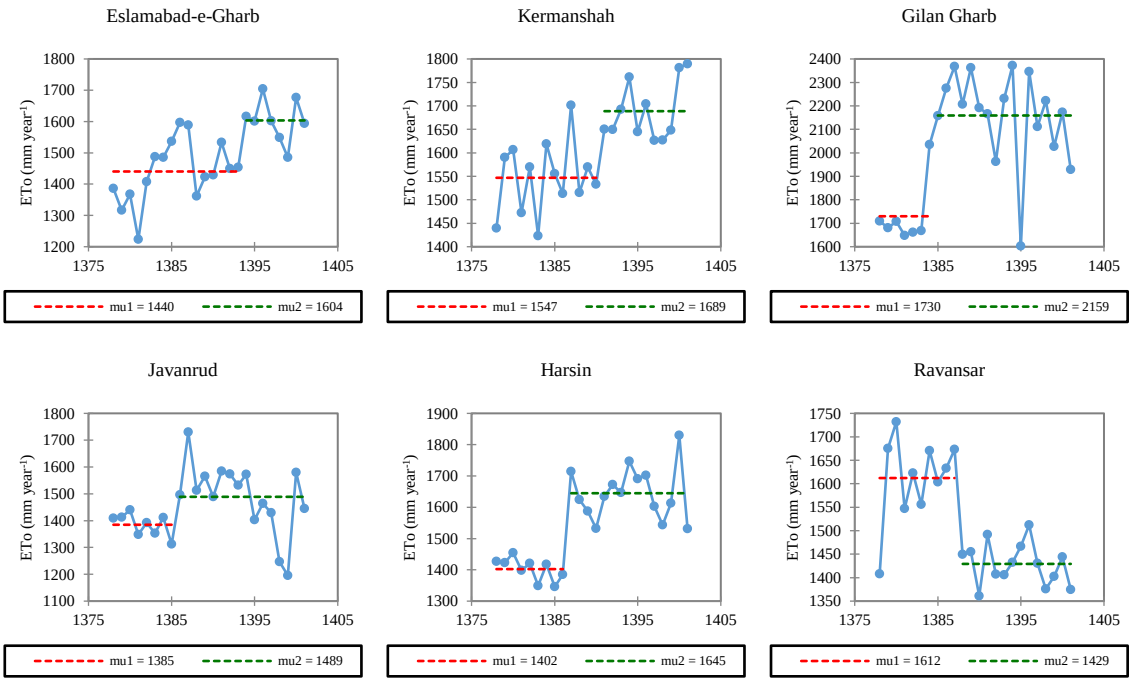



**Fig. 6- Sudden annual ETo changes in Eslamabad-e-Gharb, Kermanshah, Gilan Gharb, Javanrud, Hersin, Ravansar stations**

**شکل ٦- تغییرات ناگهانی ETo سالانه در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود، هرسین، روانسر**

**جدول ۳- سال و مقدار تغییر تبخیر تعرق مرجع (mm) در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه**

**Table 3- The year and value of reference evapotranspiration change (mm) in synoptic meteorological stations of Kermanshah province**

| Station | Parameter | Farvardin | Ordibehesht | Khordad | Tir | Mordad | Shahrivar | Mehr | Aban | Azar | Day | Bahman | Esfand | Annual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eslamabad-e-Gharb | Year of change | - | - | 1384 | 1382 | 1393 | 1394 | 1393 | - | - | - | 1390 | - | 1393 |
| | Value | - | - | 22.4 | 46.9 | 31.3 | 30.8 | 23 | - | - | - | 8.4 | - | 164 |
| Kermanshah | Year of change | - | - | - | 1391 | 1390 | 1390 | 1391 | 1394 | 1391 | 1386 | 1390 | - | 1390 |
| | Value | - | - | - | 22.4 | 18.5 | 18.7 | 17.5 | 16.3 | 6.3 | 8.3 | 9.6 | - | 142 |
| Sarpol Zahab | Year of change | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Value | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sonqor | Year of change | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | Value | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Qasr-e-Shirin | Year of change | 1386 | 1383 | 1383 | - | - | - | 1392 | - | - | - | - | - | - |
| | Value | 23.9 | 29.3 | 46.1 | - | - | - | -20.5 | - | - | - | - | - | - |
| Kangavar | Year of change | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1386 | - | - | - |
| | Value | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 6.9 | - | - | - |
| Gilan Gharb | Year of change | 1386 | 1384 | 1384 | 1384 | 1384 | 1385 | 1384 | 1385 | 1383 | 1383 | 1384 | 1383 | 1384 |
| | Value | 28.4 | 40.4 | 63.4 | 39.4 | 57.9 | 53.6 | 41.5 | 28.8 | 31.5 | 22.9 | 16.7 | 20.5 | 429 |
| Javanrud | Year of change | - | - | - | 1385 | 1385 | 1385 | 1392 | - | - | - | - | - | 1385 |
| | Value | - | - | - | 31.7 | 32.5 | 23.7 | -15.8 | - | - | - | - | - | 104 |
| Harsin | Year of change | 1386 | 1390 | 1386 | 1386 | 1386 | 1386 | - | - | - | - | 1386 | 1385 | 1386 |
| | Value | 27.1 | 29 | 36.5 | 45.7 | 54.7 | 28.2 | - | - | - | - | 9.9 | 12.7 | 243 |
| Ravansar | Year of change | - | - | 1389 | 1388 | 1388 | 1387 | 1387 | 1387 | - | - | - | 1389 | 1387 |
| | Value | - | - | -31.4 | -28.4 | -32.1 | -19.9 | -16.1 | -13.1 | - | - | - | -9 | -183 |

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107

مقدار تفاوت میانگین تبخیر تعرق مرجع قبل و بعد از سال تغییر برای ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود، هرسین و روانسر در ماه تیر به‌ترتیب ۴۶/۹ (۱۳۸۲)، ۲۲/۴ (۱۳۹۱)، ۳۹/۴ (۱۳۸۴)، ۳۱/۷ (۱۳۸۵)، ۴۵/۷ (۱۳۸۶) و ۲۸/۴- (۱۳۸۸) میلی‌متر، در ماه مرداد به‌ترتیب به‌ترتیب ۳۱/۳ (۱۳۹۳)، ۱۸/۵ (۱۳۹۰)، ۵۷/۹ (۱۳۸۴)، ۳۲/۵ (۱۳۸۵)، ۵۴/۷ (۱۳۸۶) و ۳۲/۱- (۱۳۸۸) میلی‌متر و در ماه شهریور به‌ترتیب به‌ترتیب ۳۰/۸ (۱۳۹۴)، ۱۸/۷ (۱۳۹۰)، ۵۳/۶ (۱۳۸۵)، ۲۳/۷ (۱۳۸۵) ۲۸/۲ (۱۳۸۶) و ۱۹/۹- (۱۳۸۷) میلی‌متر حاصل شد. مقدار این تفاوت در ماه مهر برای ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، قصر شیرین، گیلانغرب، جوانرود، و روانسر به‌ترتیب ۲۳/۰ (۱۳۹۳)، ۱۷/۵ (۱۳۹۱)، ۲۰/۵- (۱۳۹۲)، ۴۱/۵ (۱۳۸۴)، ۱۵/۸- (۱۳۹۲) و ۱۶/۱- (۱۳۸۷) میلی‌متر به‌دست آمد. مقدار تفاوت ذکر شده در ماه آبان برای ایستگاه‌های کرمانشاه، گیلانغرب و روانسر به‌ترتیب ۱۶/۳ (۱۳۹۴)، ۲۸/۸ (۱۳۸۵) و ۱۳/۱- (۱۳۸۷) میلی‌متر بود. مقدار این تفاوت در ماه آذر برای ایستگاه‌های کرمانشاه و گیلانغرب به‌ترتیب ۶/۳ (۱۳۹۱) و ۳۱/۵- (۱۳۸۳) میلی‌متر شد. مقدار تفاوت ذکر شده در ماه دی برای ایستگاه‌های کرمانشاه، کنگاور و گیلانغرب به‌ترتیب ۸/۳ (۱۳۸۶)، ۶/۹ (۱۳۸۶) و ۲۲/۹ (۱۳۸۳) میلی‌متر بود. مقدار این تفاوت در ماه بهمن برای ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب و هرسین به‌ترتیب ۸/۴ (۱۳۹۰)، ۹/۶ (۱۳۹۰)، ۱۶/۷ (۱۳۸۴) و ۹/۹ (۱۳۸۶) میلی‌متر شد. مقدار تفاوت ذکر شده در ماه اسفند برای ایستگاه‌های گیلانغرب، هرسین و روانسر به‌ترتیب ۲۰/۵ (۱۳۸۳)، ۱۲/۷ (۱۳۸۵) و ۹/۰- (۱۳۸۹) میلی‌متر بود. همچنین نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد مقدار تفاوت میانگین تبخیر تعرق مرجع سالانه قبل و بعد از سال تغییر در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، گیلانغرب، جوانرود هرسین و روانسر به‌ترتیب ۱۶۴ (۱۳۹۳)، ۱۴۲ (۱۳۹۰)، ۴۲۹ (۱۳۸۴)، ۱۰۴ (۱۳۸۵)، ۲۴۳ (۱۳۸۶) و ۱۸۳- (۱۳۸۷) میلی‌متر بود.

به‌منظور یافتن دلیل کاهش تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه روانسر، سری زمانی هر یک از عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه با آزمون پتیت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این آزمون در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد آزمون پتیت برای سری‌های زمانی حداقل، حداکثر و میانگین دمای هوا، حداکثر رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در ایستگاه روانسر در سطح احتمال پنج درصد و سرعت باد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده‌ی وجود تغییر ناگهانی این پارامترها می‌باشد. در شکل (۷) تغییرات ناگهانی عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه روانسر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد به‌جز عوامل تابش خالص و حداقل رطوبت نسبی سالانه سایر عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه دارای تغییر ناگهانی بودند. مقدار و سال تغییر عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه روانسر نیز در جدول (۵) ارائه شده است.

نتایج این جدول نشان می‌دهد میانگین حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دما، حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی سالانه به‌ترتیب بعد از سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۹۲، ۱۳۹۰، ۱۳۹۲، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ به‌طور ناگهانی تغییر داشت. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد هرچند که میانگین دما، حداقل و حداکثر دمای سالانه‌ی بعد از سال‌های دارای تغییر ناگهانی به‌ترتیب ۵/۳ (۱۳۹۰)، ۸/۵ (۱۳۹۰) و ۴/۴ (۱۳۹۲) درصد نسبت به میانگین آن‌ها در قبل از سال‌های دارای تغییر ناگهانی، افزایش یافته است اما با افزایش ۵/۷ (۱۳۹۲) درصدی میانگین حداکثر رطوبت نسبی و کاهش ۲۸/۷ (۱۳۸۸) درصدی سرعت باد و ۴/۲ (۱۳۹۳) درصدی ساعات آفتابی سالانه موجب کاهش ۱۱/۴ درصدی (۱۳۸۷) تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه روانسر در شکل (۶) شده است. لازم به ذکر است که اعداد داخل پرانتز مربوط به سال تغییر ناگهانی عامل مورد نظر می‌باشد. در مطالعه‌ی Jhajharia et al. (2012) نیز به تناقض افزایش دما ضمن کاهش تبخیر تعرق اشاره شده است. نتایج پژوهش Liu و Zhang (2013) نشان داد که کاهش قابل توجه سرعت باد بر تغییر تبخیر تعرق مرجع غالب بوده و اثر افزایش دمای هوا که باعث افزایش تبخیر تعرق مرجع می‌شود را خنثی کرده و منجر به کاهش آن می‌شود. این نتیجه موافق با یافته‌های نتایج پژوهش حاضر است. نتایج مطالعه Dinpazhoh و Foroughi (2018) نشان داد که علت کاهشی بودن تغییرات تبخیر تعرق مرجع سالانه در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه (سهند و پارس آباد) هرچند که به‌علت اثر هم‌زمان عوامل هواشناسی شامل سرعت باد، دمای هوا و غیره می‌باشد اما کاهش سرعت باد در این مناطق باعث افزایش میزان مقاومت سطحی انتشار بخار آب روزنه‌های برگ گیاه شده و در نتیجه موجب کاهش تبخیر تعرق مرجع می‌شود. نتایج ایشان با نتایج پژوهش حاضر که کاهش سرعت باد موجب کاهش تبخیر تعرق مرجع می‌شود همخوانی دارد. نتایج مطالعه Ghasemi (2015) نشان داد دمای هوا در ایران در دوره آماری ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۰ به‌میزان ۰/۱ تا ۰/۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است که با نتایج این پژوهش در مورد افزایش دمای هوا در ایستگاه روانسر مطابقت دارد. مطالعه Xu et al. (2015) در چین نشان داد کاهش سرعت باد غالب‌ترین عامل برای روند نزولی تبخیر تعرق مرجع بود که موافق یافته‌های این پژوهش می‌باشد.

بیشترین مقدار تغییرات ناگهانی میانگین تبخیر تعرق مرجع ماهانه و سالانه، سال تغییر و مقدار میانگین آن در قبل و بعد از تغییر در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد تمامی ماه‌های سال دارای ایستگاه‌هایی هستند که تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع در آن‌ها رخ داده است. ماه‌های تیر تا مهر با شش ایستگاه (۶۰ درصد) دارای بیشترین و ماه آذر با دو ایستگاه (۲۰ درصد) دارای کمترین تعداد ایستگاه با تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع می‌باشد.

**جدول ٤- نتایج آزمون پتیت برای عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک روانسر**

**Table 4- the results of Pettitt's test for the factors affecting the annual reference evapotranspiration in synoptic meteorological station of Ravansar**

| Pettitt's test statistics | $T_{min}$ | $T_{max}$ | $T_{mean}$ | $RH_{min}$ | $RH_{max}$ | $u_2$ | n | Rn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_t$ | 101 | 89 | 97 | 77 | 99 | 135 | 92 | 78 |
| p-value | 0.01* | 0.03* | 0.014* | 0.09 | 0.01* | 0.00** | 0.03* | 0.09 |

Notes: * and ** indicate significant difference at a 5% probability level ($P < 0.05$), and significant difference at a 1% probability level ($P < 0.01$), respectively.

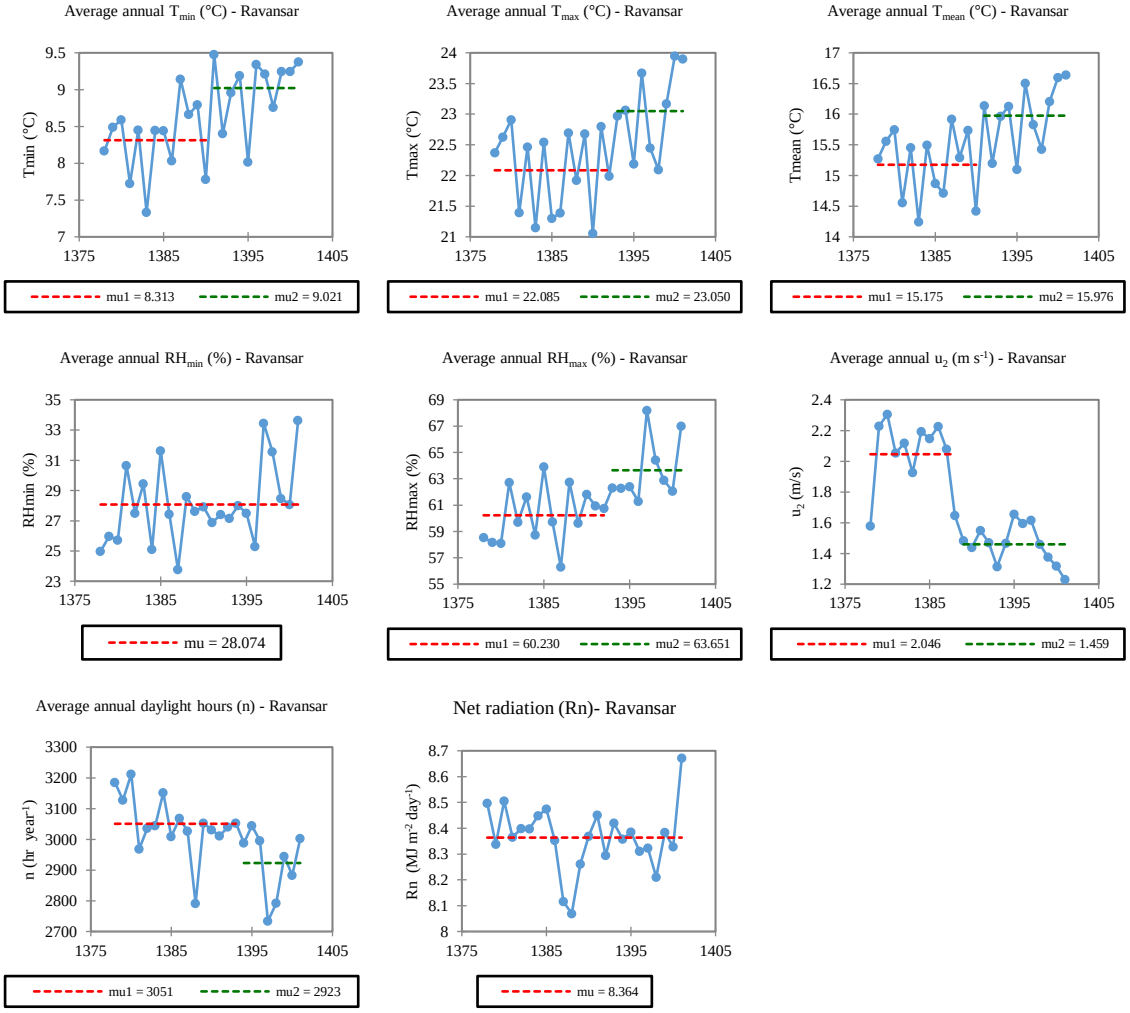



**Fig. 7- Sudden changes of the factors affecting on the annual ETo in Ravansar station**

Notes: ETo: Reference evapotranspiration; $T_{min}$: Minimum air temperature; $T_{max}$: Maximum air temperature; $T_{mean}$: Mean air temperature; $RH_{min}$: Minimum air relative humidity; $RH_{max}$: Maximum air relative humidity; $u_2$: Wind speed at 2 m above ground surface; n: Daylight hours; Rn: Net radiation.

**شکل ۷- تغییرات ناگهانی عوامل مؤثر بر ETo سالانه در ایستگاه روانسر**

**جدول ٥- سال و مقدار تغییر عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک روانسر**

**Table 5- the year and value of change of the factors affecting the annual reference evapotranspiration in synoptic meteorological station of Ravansar**

| Parameter | $T_{min}$ (°C) | $T_{max}$ (°C) | $T_{mean}$ (°C) | $RH_{min}$ (%) | $RH_{max}$ (%) | $u_2$ (m $s^{-1}$) | n (hr $year^{-1}$) | Rn (MJ $m^{-2}$ $day^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Value of change | 0.71 | 0.97 | 0.80 | - | 3.42 | -0.59 | -128 | - |
| Percentage change | 8.5 | 4.4 | 5.3 | - | 5.7 | -28.7 | -4.2 | - |
| Year of change | 1390 | 1392 | 1390 | - | 1392 | 1388 | 1393 | - |

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107

**جدول ٦- بیشترین مقدار تغییرات میانگین تبخیر تعرق مرجع ماهانه ($mm\ month^{-1}$) و سالانه ($mm\ year^{-1}$) و سال تغییر آن در بین ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه**

**Table 6- The greatest value of changes in the average monthly ($mm\ month^{-1}$) and annual reference evapotranspiration ($mm\ year^{-1}$) and the year of its change among the synoptic meteorological stations of Kermanshah province**

| Parameter | Farvardin | Ordibehesht | Khordad | Tir | Mordad | Shahrivar | Mehr | Aban | Azar | Day | Bahman | Esfand | Annual |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Number of stations with change | 3 | 3 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 6 |
| Percent | 30 | 30 | 50 | 60 | 60 | 60 | 60 | 30 | 20 | 30 | 40 | 30 | 60 |
| Station with most change | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Eslamabad-e-Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb | Gilan Gharb |
| Year of change | 1386 | 1384 | 1384 | 1382 | 1384 | 1385 | 1384 | 1385 | 1383 | 1383 | 1384 | 1383 | 1384 |
| Average ETo before | 126 | 174.7 | 222.7 | 202.4 | 250.7 | 217.1 | 149.3 | 86.8 | 41.8 | 42.9 | 57.5 | 83.8 | 1730 |
| Average ETo after | 154.4 | 215.1 | 286.1 | 249.3 | 308.6 | 270.7 | 190.8 | 115.6 | 73.3 | 65.8 | 74.2 | 104.3 | 2159 |
| Value of change | 28.4 | 40.4 | 63.4 | 46.9 | 57.9 | 53.6 | 41.5 | 28.8 | 31.5 | 22.9 | 16.7 | 20.5 | 429 |

ایستگاه گیلانغرب در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در ۱۱ ماه سال (همه ماه‌های سال به جز تیرماه) دارای بیشترین مقدار تغییرات ناگهانی میانگین تبخیر تعرق مرجع ماهانه بوده است که بیشترین مقدار این تغییرات در بین ماه‌های مورد بررسی مربوط به ماه خرداد با ۶۳/۴ میلی‌متر (در سال ۱۳۸۴) بوده است (جدول ۶). در تیرماه نیز ایستگاه اسلام‌آباد غرب با ۴۶/۹ میلی‌متر (در سال ۱۳۸۲) دارای بیشترین مقدار تغییرات ناگهانی میانگین تبخیر تعرق مرجع بوده است. دامنه سال‌های بیشترین مقدار تغییر ناگهانی میانگین تبخیر تعرق مرجع ماهانه بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۶ بود به طوری‌که سال ۱۳۸۴ در پنج ماه سال (اردیبهشت، خرداد، مرداد، مهر و بهمن) دارای بیشترین فراوانی این تغییر می‌باشد. هم‌چنین نتایج جدول (۶) در مقیاس سالانه نشان می‌دهد تعداد ۶ ایستگاه (۶۰ درصد) از بین ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای تغییرات ناگهانی میانگین تبخیر تعرق مرجع سالانه بودند به‌طوری که از میان آن‌ها ایستگاه گیلانغرب با ۴۲۹ میلی‌متر (سال ۱۳۸۴) دارای بیشترین مقدار این تغییر بوده است. به عبارت دیگر میانگین تبخیر تعرق مرجع سالانه در این ایستگاه قبل از سال ۱۳۸۴، ۱۷۳۰ میلی‌متر بوده که بعد از این سال به طور ناگهانی میانگین آن به ۲۱۵۹ میلی‌متر افزایش یافته است.

به‌منظور یافتن دلیل بیشترین افزایش تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه گیلانغرب، سری زمانی هر یک از عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه با آزمون پتیت بررسی شد که نتایج این آزمون در جدول (۷) نشان داده شده است. نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد آزمون پتیت برای سری‌های زمانی حداقل و حداکثر دمای هوا در ایستگاه گیلانغرب در سطح احتمال پنج درصد و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و تابش خالص سالانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده و نشان‌دهنده‌ی وجود تغییر ناگهانی این پارامترها می‌باشد. در شکل (۸) تغییرات ناگهانی عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه گیلانغرب نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد به‌جز متغیرهای میانگین دما و حداقل رطوبت نسبی سالانه سایر متغیرهای مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه دارای تغییر ناگهانی بودند. مقدار و سال تغییر عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه گیلانغرب نیز در جدول (۸) ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد میانگین حداقل دما، حداکثر دما، حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و تابش خالص سالانه به‌ترتیب بعد از سال‌های ۱۳۸۳، ۱۳۸۳، ۱۳۸۳، ۱۳۸۴، ۱۳۸۴، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۵ به‌طور ناگهانی تغییر داشت. نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد هرچند که حداکثر دمای سالانه‌ی بعد از سال دارای تغییر ناگهانی ۵/۰ (۱۳۸۳) درصد نسبت به میانگین آن در قبل از سال دارای تغییر ناگهانی، کاهش یافته است اما با افزایش ۱۶/۶ (۱۳۹۲) درصدی میانگین حداقل دمای سالانه، ۷۵/۳ درصدی سرعت باد، ۴۶/۵ درصدی ساعات آفتابی و ۱۷/۴ درصدی تابش خالص و کاهش ۲۲/۹ درصدی حداکثر رطوبت نسبی سالانه موجب افزایش ۲۴/۸ درصدی (۱۳۸۴) تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه گیلانغرب شده است (شکل ۶). لازم به ذکر است که اعداد داخل پرانتز مربوط به سال تغییر ناگهانی متغیر مورد نظر می‌باشد. نتایج پژوهش Fu et al. (2022) در چین نشان داد که افزایش دما و سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی اثرات مثبت و بزرگی بر افزایش تبخیر تعرق مرجع داشته و کاهش تابش آفتاب در مناطق مختلف کشاورزی اثرات کاهشی بر این عامل داشته که موافق نتایج پژوهش حاضر است. نتایج پژوهش Eslamian et al. (2011) در تهران، اصفهان، شیراز، تبریز و مشهد نشان داد دما و رطوبت نسبی بیشترین تأثیر را در تبخیر تعرق مرجع دارند.

**جدول ۷- نتایج آزمون پتیت برای متغیرهای مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک گیلانغرب**

**Table 7- the results of Pettitt's test for the variables affecting the annual reference evapotranspiration in synoptic meteorological station of Gilan Gharb**

| Pettitt's test statistics | $T_{min}$ | $T_{max}$ | $T_{mean}$ | $RH_{min}$ | $RH_{max}$ | $u_2$ | n | Rn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_t$ | 94 | 86 | 57 | 38 | 108 | 109 | 108 | 108 |
| p-value | 0.02* | 0.04* | 0.34 | 0.80 | 0.004** | 0.003** | 0.004** | 0.004** |

Notes: * and ** indicate significant difference at a 5% probability level ($P < 0.05$), and significant difference at a 1% probability level ($P < 0.01$), respectively.

**جدول ۸- سال و مقدار تغییر متغیرهای مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع سالانه در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک گیلانغرب**

**Table 8- the year and value of change of the variables affecting the annual reference evapotranspiration in synoptic meteorological station of Gilan Gharb**

| Parameter | $T_{min}$ (°C) | $T_{max}$ (°C) | $T_{mean}$ (°C) | $RH_{min}$ (%) | $RH_{max}$ (%) | $u_2$ (m $s^{-1}$) | n (hr $year^{-1}$) | Rn (MJ $m^{-2}$ $day^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Value of change | 1.95 | -1.4 | - | - | -15.2 | 1.39 | 1392 | 1.44 |
| Percentage change | 16.6 | -5.0 | - | - | -22.9 | 75.3 | 46.5 | 17.4 |
| Year of change | 1383 | 1383 | - | - | 1383 | 1384 | 1395 | 1395 |

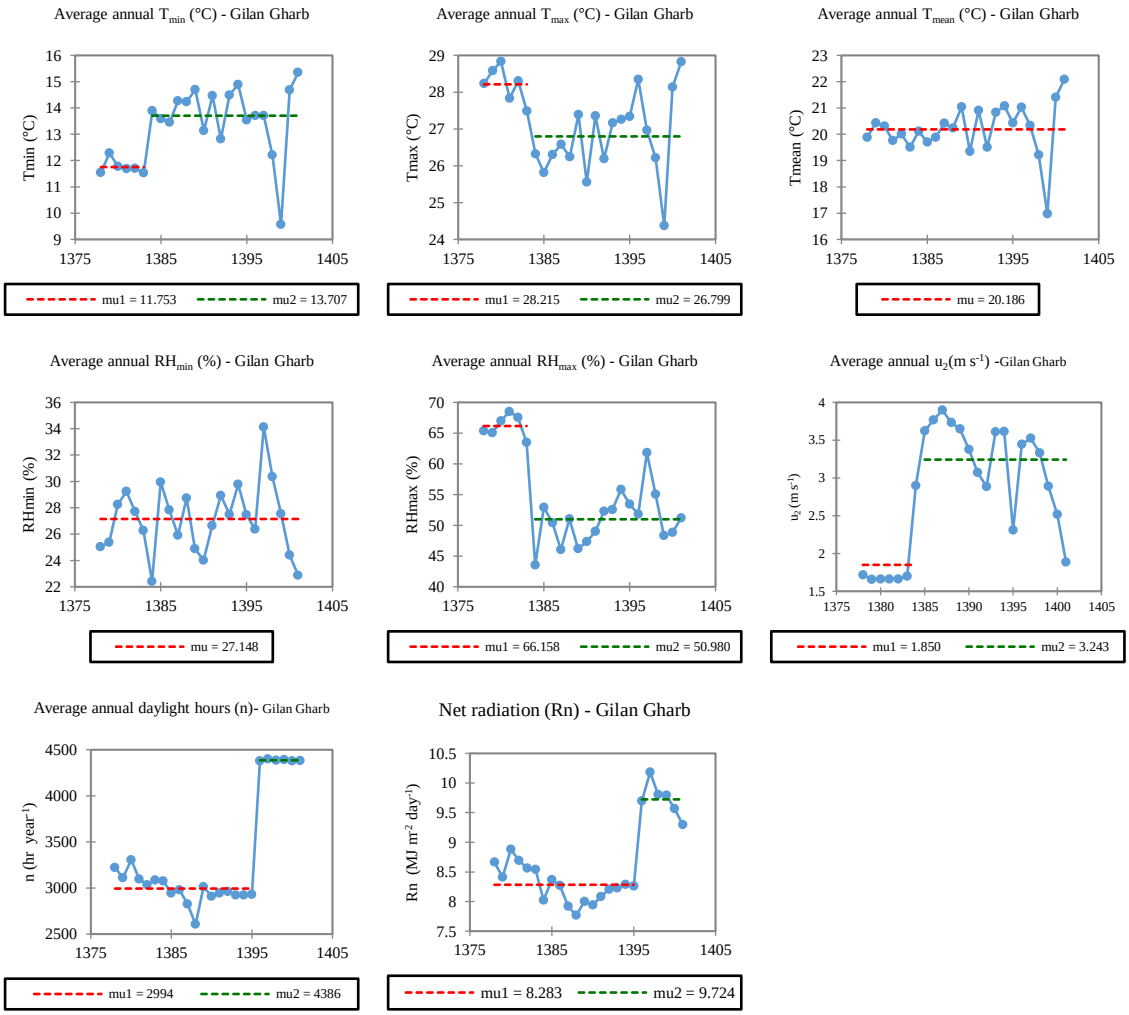



**Fig. 8- Sudden changes of the factors affecting on the annual ETo in Gilan Gharb station**

**Notes: ETo: Reference evapotranspiration; $T_{min}$: Minimum air temperature; $T_{max}$: Maximum air temperature; $T_{mean}$: Mean air temperature; $RH_{min}$: Minimum air relative humidity; $RH_{max}$: Maximum air relative humidity; $u_2$: Wind speed at 2 m above ground surface; n: Daylight hours; Rn: Net radiation.**

**شکل ۸- تغییرات ناگهانی عوامل مؤثر بر ETo سالانه در ایستگاه گیلانغرب**

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45541.2107

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغییرات تبخیر تعرق مرجع ماهانه و سالانه و عوامل اقلیمی مؤثر بر آن در ۱۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۷۸ با استفاده از آزمون پتیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد متغیرهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع در حال تغییر هستند. در مقیاس ماهانه ۴۲ درصد از سری‌های زمانی تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد بررسی دارای تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع بودند که از این میان ۸۲ درصد ایستگاه‌ها دارای تغییرات افزایشی رو به بالا بوده و تنها در ۱۸ درصد از آن‌ها تغییرات کاهشی رو به پایین بوده است. بازه زمانی این تغییرات از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ بود. در مقیاس سالانه نیز ۶۰ درصد از سری‌های زمانی تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد بررسی دارای تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع شدند که از این میان ۸۳ درصد ایستگاه‌ها دارای تغییرات افزایشی رو به بالا بوده و تنها در ۱۷ درصد از آن‌ها تغییرات کاهشی رو به پایین اتفاق افتاد. بازه زمانی این تغییرات نیز از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ بود. در بین ماه‌های سال نیز، ماه‌های تیر تا مهر در ۶۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای بیشترین تغییرات ناگهانی تبخیر تعرق مرجع بودند که از این میان ۷۵ درصد ایستگاه‌ها دارای تغییرات افزایشی رو به بالا بوده و تنها در ۲۵ درصد از آن‌ها تغییرات کاهشی رو به پایین داشتند. این امر نشان می‌دهد نیاز آبی محصولات بهاره به طور کلی در استان افزایش یافته است. در پایان نتایج این مطالعه نشان می‌دهد به‌طور کلی از بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ به بعد، تغییرات ناگهانی افزایشی تبخیر تعرق مرجع در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمانشاه رخ داده است و باعث افزایش میزان نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در این استان گردیده است و باید منابع آبی استان را با برنامه‌ریزی مناسب‌تر در اختیار بخش کشاورزی قرار دهند. توصیه می‌شود کشاورزان نیز با لحاظ این امر که نیاز آبی گیاهان در استان افزایش یافته است با برنامه‌ریزی بهتری نسبت به انتخاب گیاه و مساحت کشت محصولات خود اقدام کنند تا با کاهش محصول مواجه نشوند. در این پژوهش تنها از داده‌های هواشناسی ۲۴ ساله (۱۳۷۸ تا ۱۴۰۱) برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع و تغییرات آن استفاده شده است. اگر داده‌های بیشتری به‌عنوان مثال بیش از ۵۰ سال در دسترس بود، نتایج بهتری می‌توانست به‌دست آید. همچنین در سال‌های اخیر با توجه به افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای مثل دی اکسید کربن و تأثیر احتمالی آن بر تبخیر تعرق گیاه مرجع (چمن یا یونجه)، علاوه بر متغیرهای هواشناسی می‌بایست پاسخ فیزیولوژیکی گیاه مرجع به تغییرات غلظت دی اکسید کربن هوا نیز مورد توجه قرار گیرد. با این حال، در پژوهش حاضر این موضوع مورد توجه قرار نگرفته است و نیاز به تحقیقات بیشتری در این راستا وجود دارد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مسئولین سامانه نیاز آبی گیاهان کشور، مؤسسه تحقیقات خاک و آب و سازمان هواشناسی کشور به دلیل همکاری‌های لازم و در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این مطالعه کمال تقدیر و تشکر را دارند.

## Refrences

1- Ahmadi, A., Daccache, A., Snyder, R.L. and Suvočarev, K., 2022. Meteorological driving forces of reference evapotranspiration and their trends in California. *Science of the Total Environment, 849,* p. 157823. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157823.

2- Akhvan, S., Mousabeygi, F. and Hashemi Garmdareh, S.E., 2019. Assessment of reference evapotranspiration (ETo) methods under data scarcity scenarios (case study: Kermanshah). *Journal of Irrigation and Water Engineering, 9(1),* pp. 183–197. doi: 10.22125/iwe.2018.93443 (In Persian).

3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.

4- de Martonne, E., 1926. L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de géographes français, 3 (9)*, pp. 3–5. doi: 10.3406/bagf.1926.6321.

5- de Oliveira, R.G., Valle Júnior, L.C.G., da Silva, J.B., Espíndola, D.A.L.F., Lopes, R.D., Nogueira, J.S., Curado, L.F.A., et al., 2021. Temporal trend changes in reference evapotranspiration contrasting different land uses in southern Amazon basin. *Agricultural Water Management, 250,* p. 106815. doi: 10.1016/j.agwat.2021.106815.

6- Di Nunno, F. and Granata, F., 2023. Future trends of reference evapotranspiration in Sicily based on CORDEX data and Machine Learning algorithms. *Agricultural Water Management, 280,* p. 108232. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108232.

7- Dinpazhoh, Y. and Foroughi, M., 2018. Impact of Climate Change on Sudden Changes in Potential Evapotranspiration Time Series (Case Study: NW of Iran). *Journal of Water and Soil, 32(3),* pp. 617–632. doi: 10.22067/jsw.v32i3.71351 (In Persian).

8- Dinpazhoh, Y., Jahanbakhsh Asl, S. and Foroughi, M., 2019. Sensitivity Analysis of Evapotranspiration to Change in Meteorological Parameters in North-West and West of Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation, 8(2),* pp. 1–14. (In Persian).

9- Ebrahimi Haftcheshmeh, I. and Farhadi Bansouleh, B., 2021. Spatial variation of reference evapotranspiration in Kermanshah province. *Journal of Agricultural Meteorology, 9(2),* pp. 61–66. doi: 10.22125/agmj.2021.262567.1106 (In Persian).

10- Eslamian, S., Khordadi, M. J. and Abedi-Koupai, J., 2011. Effects of variations in climatic parameters on evapotranspiration in the arid and semi-arid regions. *Global and Planetary Change, 78 (3–4),* pp. 188–194. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.07.001.

11- Fisher, J.B., Whittaker, R.J. and Malhi, Y., 2011. ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography, 20(1),* pp. 1–18. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00578.x.

12- Fu, J., Gong, Y., Zheng, W., Zou, J., Zhang, M., Zhang, Z., Qin, J., Liu, J., Quan, B., 2022. Spatial-temporal variations of terrestrial evapotranspiration across China from 2000 to 2019. *Science of The Total Environment, 825,* p. 153951. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153951.

13- Ghamarnia, H., Mousabeygi, F., Amiri, S. and Amirkhani, D., 2015. Evaluation of a Few Evapotranspiration Models Using Lysimeteric Measurements in a Semi Arid Climate Region. *International Journal of Plant & Soil Science, 5(2),* pp. 100–109. doi: 10.9734/IJPSS/2015/14320.

14- Ghasemi, A.R., 2015. Changes and trends in maximum, minimum and mean temperature series in Iran. *Atmospheric Science Letters, 16(3),* pp. 366–372. doi: 10.1002/asl2.569.

15- Haghizadeh, A., Bayat, V. and Arshia, A., 2019. Estimation of The Evapotranspiration potential of Kermanshah synoptic stations Using Genetic Programming. *Journal of Geographic Space, 19(67),* pp. 29–42. (In Persian).

16- Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Singh, V.P. and Fakheri-Fard, A., 2012. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes, 26(3),* pp. 421–435. doi: 10.1002/hyp.8140.

17- Jovzi, M., Ebrahimi Pak, N.A. and Tafteh, A., 2023. Estimation of reference crop evapotranspiration by Hargreaves Samani and modified Hargreaves Samani methods and evaluating them using the water requirement system of plants in Kermanshah province. *Hydrogeology, 8(1),* pp. 1–16. doi: 10.22034/hydro.2023.53196.1271 (In Persian).

18- Li, Y., Yao, N. and Chau, H.W., 2017. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment, 592,* pp. 680–692. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.196.

19- Liang, L., Li, L. and Liu, Q., 2010. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology, 150(2),* pp. 298–306. doi: 10.1016/j.agrformet.2009.11.014.

20- Liu, X. and Zhang, D., 2013. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature. *Hydrological Processes, 27(26),* pp. 3941–3948. doi: 10.1002/hyp.9527.

21- Maunder, W.J., 1995. *Dictionary of Global Climate Change.* 1st ed., Springer US, Boston, MA. doi: 10.1007/978-1-4615-6841-4.

22- Mirmousavi, H., Panahi, H., Akbari, H. and Akbarzadeh, Y., 2012. Calibration Methods to Estimate Reference Crop Evapotranspiration and Calculated Potential Water Requirements of Olive Plant in Kermanshah Province. *Geography and Environmental Sustainability, 2(2),* pp. 45–64. (In Persian).

23- Peterson, T.C., Golubev, V.S. and Groisman, P.Y., 1995. Evaporation losing its strength. *Nature, 377,* pp. 687–688. doi: 10.1038/377687b0.

24- Pettitt, A.N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics, 28(2),* pp. 126–135. doi: 10.2307/2346729.

25- Rahman, M.N., Azim, S.A., Jannat, F.A., Hasan Rony, M.R., Ahmad, B. and Sarkar, M.A.R., 2023. Quantification of rainfall, temperature, and reference evapotranspiration trend and their interrelationship in sub-climatic zones of Bangladesh. *Heliyon, 9(9),* p. e19559. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19559.

26- Soil and Water Research Institute, 2023. *Water Requirement System of Plants*. available at: http://niwr.ir/Login.aspx..

27- Sumner, D.M. and Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology, 308(1–4),* pp. 81–104. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.023.

28- Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaee, P.H. and Mohammadi, K., 2011. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology, 151(2),* pp. 128–136. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.09.009.

29- Xu, L., Shi, Z., Wang, Y., Zhang, S., Chu, X., Yu, P., Xiong, W., et al., 2015. Spatiotemporal variation and driving forces of reference evapotranspiration in Jing River Basin, northwest China. *Hydrological Processes, 29(23),* pp. 4846–4862. doi: 10.1002/hyp.10541.

30- Yang, L., Feng, Q., Adamowski, J.F., Yin, Z., Wen, X., Wu, M., Jia, B., et al., 2020. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in northwest China based on CORDEX-EA. *Atmospheric Research, 238,* p. 104868. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104868.

31- Yassen, A.N., Nam, W. H. and Hong, E. M., 2020. Impact of climate change on reference evapotranspiration in Egypt. *CATENA, 194,* p. 104711. doi: 10.1016/j.catena.2020.104711.

32- Yin, Y., Wu, S. and Dai, E., 2010. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971–2008. *Chinese Science Bulletin, 55(29),* pp. 3329–3337. doi: 10.1007/s11434-010-3289-y.

33- Zare Abyaneh, H., Saghaei, S., Ershad-Fath, F. and Nozari, H., 2014. Modeling and Forecasting of Reference Crop Evapotranspiration Using Time Series, Case Study: Kermanshah Province. *Journal of Agricultural Meteorology, 2(1),* pp. 45–56. (In Persian).

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 113-126**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**Research Paper**

**EXTENDED ABSTRACT**

# Water quality assessment of Gamasiab River using heavy metal pollution indicators in spring and summer

M. Ebrahimian Najafabadi[1], A. Ildoromi[2*], S. Mortazavi[3] and E. Mohammadimanesh[4]

*1- Ph.D student, environmental group, Natural Resources Faculty, Malayer University, Iran.*
*2*- Corresponding Author, Professor of Natural engineering Faculty, Malayer University, Iran. (a.ildoromi@malayeru.ac.ir).*
*3-Assistant Professor of Environmental group, Natural Resources Faculty, Malayer University, Iran.*
*4-Associate Professor, Department of Solid State Physics, Faculty of Basic Sciences, Malayer University.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 27 December 2023
Revised: 23 May 2024
Accepted: 25 May 2024

*Keywords:*
Water pollution, Ecological effect, Heavy metals, Gamasiab river.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Ebrahimian Najafabadi, M., Ildoromi, A., Mortazavi, S., Mohammadimanesh, E. (2025). 'Water quality assessment of Gamasiab River using heavy metal pollution indicators in spring and summer', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 113-126. doi: 10.22055/jise.2024.45557.2108

## Abstract

Rivers are one of the most important water sources used in the drinking, agriculture and industry sectors. This present study aims to evaluate the ecological effect of the presence of heavy metals (chromium, copper, nickel, zinc, iron and manganese) in the water of Gamasiab river using Heavy Metal Pollution Index, Metal Index Index) and heavy metal evaluation index (Heavy metal Evaluation Index) were done. In this research, 90 water samples were collected from 15 stations in two seasons, spring and summer, from Gamasiab River. After transferring the samples to the laboratory, the samples were prepared using the ASTM method, and the concentration of heavy metals was measured with the ICP-OES inductively coupled plasma spectrometer. According to the concentration of heavy metals in water samples, the HPI index was calculated for both seasons and the results were analyzed. The numerical value of the HPI index in spring and summer was -2.46 and -3.34, respectively, which indicates that the water of Gamasiab river is not polluted. The investigation of the MI index to evaluate the quality of water for drinking showed that in spring and summer, the water of the Gamasiab River is in the potable category. The value of MI index was reported as 0.075 in spring and 0.01 in summer. According to the HEI index, the water of Gamasiab river in the spring and summer season was placed in the category of low pollution with numerical values of 75 and 12.35, respectively. According to the results certainty the degree of contamination of Gamasiab river water with heavy metals is low and does not threaten the ecological of the region. The concentration of heavy metals in the spring season and the summer season, it is suggested to prevent water pollution in this season by monitoring the water quality.

## Introduction

Among the aquatic ecosystems, rivers are considered as one of the basic sources of water supply for various uses, including agriculture, industry, and drinking, which are directly or indirectly affected by any human activity (Majlesi et al., 2019). Along with the growth and development of urban, industrial and economic activities during the last few decades and the production of various types of chemical compounds, pollutants have been unintentionally introduced into nature, which has brought serious problems and dangers to the environment and humans (Seifi and Rahi, 2019). . Currently, the pollution of aquatic ecosystems is one of the serious environmental threats (Bayati et al., 2020). Li et al., (2020) investigated heavy metals in the Songhua River in China. In this research, the index of heavy metal pollution was used, and the results of this index showed that the water of this river is below the critical level (100) for all metals. Sahoo and Swain (2020) examined

heavy metals using the HPI index in 60 stations of surface water in the Indian peninsula. After comparing the results with international standards, the results showed that the water of these stations is within the standard range for drinking and agriculture. This research aims to evaluate the ecological effect of the presence of heavy metals (chromium, copper, nickel, zinc, iron and manganese) in the water of Gamasiab river using Heavy Metal Pollution Index, Metal Index and Heavy metal evaluation index was done.

**Methodology**

Water sampling was done in 2018 during two seasons of low rainfall (summer) and high rainfall (spring) from the stations specified in Figure 1 of the Gamasiab river with three repetitions. A total of 45 water samples were collected from 15 stations during each season. To prepare the water sample, 100 grams of the sample was poured into the beaker and 5 cc of Merck's 65% nitric acid was added to it. The sample was placed on a heater until its volume reached less than 10-20 cc, and after complete digestion, the sample was brought to 100 ml using distilled water. Finally, the concentration of the control sample and the digested samples was obtained using the ICP-OES inductively coupled plasma spectrometer (APHA, 2005). After sampling and transferring the samples to the laboratory, the required analyzes were done on each parameter. The results were analyzed using IBM SPSS and Excel statistical software, according to normality and non-normality, by relevant tests. The normality or not of the data was checked using the Kolmogorov-Smirnov test (Janisarvani and Shahrokhi, 2023). Then, to compare the results of two seasons, mean comparison (Man-Whitney-U test) was used, and Kruskal-Wallis non-parametric test was used to compare different stations. Correlation coefficient was used to check the relationship between parameters. Graphs were drawn using Excel software.

**Results and Discusson**

In this research, the concentration of heavy metals in Gamasiab river water was investigated to evaluate the river water pollution. According to the results, it was found that in the spring season, the highest concentrations are in the order of iron > zinc > chromium > nickel > manganese > copper, and in the summer season, the highest concentrations are in the order of iron > manganese > copper > zinc > nickel > It is chrome. Also, in both seasons, the highest standard deviation related to iron metal was obtained. According to the results, it was found that in the spring season, the highest concentrations are in the order of iron > zinc > chromium > nickel > manganese > copper, and in the summer season, the highest concentrations are in the order of iron > manganese > copper > zinc > nickel > chromium. be Also, in both seasons, the highest standard deviation related to iron metal was obtained. In order to increase accuracy, the samples examined in Gamasiab river water in spring and summer were compared with some studies done in Iran and the world.The concentration of metals in the Gamasiab river water sample showed lower values than other similar studies in other regions in most cases. As mentioned, the heavy metal pollution index is used to determine the effect of heavy metals on human health. For this purpose, we must compare the measured concentration of metals with the ideal concentration and standards of the World Health Organization (Farzi et al., 2022).

The numerical average of the HPI index for the spring season was -2.46 and the summer season was -3.36. As mentioned, this index examines the impact of a set of different metals on water quality (Seifi and Riahi, 2019). The results showed that, on average, Gamasiab river water is free of heavy metal contamination in terms of HPI index. This issue is due to the high water flow of the Gamasiab river and its self-purification along the route. Numerical analysis of MI index in two seasons, spring and summer, with values of 0.075 and 0.01, respectively, showed that Gamasiab river water is in the potable category in terms of heavy metal pollution.

In order to calculate the heavy metal evaluation index (HEI), the concentration obtained for each element is compared with the maximum allowed concentration of each element in water. The results showed that in spring and summer it was 12.75 and 12.35, respectively, which was lower than the risk threshold value (400).

## Conclusions

In this research, in order to investigate the contamination of Gamasiab river water with heavy metals, water sampling was done in spring and summer and the concentration of heavy metals chromium, copper, nickel, zinc, iron and manganese was investigated. According to the obtained results, there is a significant difference between the concentrations of the investigated metals in the water of Gamasiab river at the level of 0.05. Examining the average concentration of the studied metals in the river water section showed that the average concentration of all metals except zinc metal in the water in the wet season was higher than in the summer season. The reason for the high concentration of most metals in the river water in the spring season can be attributed to the increase in rainfall and precipitation in the high water season, which leads to an increase in runoff that comes from land and land around industries, roads, agricultural lands, etc. high volume of pollutants. Especially heavy metals flow into river areas. Also, considering that the volume of river water is high in the high season. Therefore, the polluting substances remaining in the water column are carried by the water and do not have a chance to settle.

## Acknowledgements

We sincerely thank the cooperation of the laboratory of environment department of Malair University for the cooperation of this research.

## References

1- Majlesi, M., Alavi, N., Atamaleki, A., Seyyed, M., and Soheili, N., 2019. Investigation of Physicochemical and Microbial Parameters of Doogh River Water and the Effect of Adjacent Felman Wells on Decreasing These Parameters in Kalaleh city During 2012-2016. *Jehe*, *7* (1), pp. 29-41.(in Persian).

2- Seifi, A. and Rahi, H., 2019. Evaluation of Heavy Metal Pollution Indices for Surface Water of the Sarcheshmeh Copper Mine using Multivariate Statistical Methods and GIS. *Iranian Journal of soil and water research, 1*(50), pp. 161–176.( in Persian).

3- Bayati, S., Zamani Ahmadmahmoodi, R., and MafiGholami, D., 2020. Water Quality Assessment of the Choghakhor Wetland for Heavy Metals Using MI, HPI, HEI, Cd and RWQIST Indices. *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(4), pp. 1021-1031. (In Persian).

4- Li, K., Cui, S., Zhang, F., Hough, R., Fu, Q., Zhang, Z., and An, L. 2020. Concentrations, possible sources and health risk of heavy metals in multi-media environment of the Songhua River, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(5), pp. 1766.

5- Sahoo, M. and Swain, J., 2020. Modified heavy metal Pollution index (m-HPI) for surface water Quality in river basins, India. Environmental Science and Pollution Research, (13)27, pp. 15350-15364.

6- APHA, AWWA, WPCF.2005. Standard Methods for Examination of Water and Waste Water. Washington: American Public Health Association. 1000-3000.

7- Janisarvani, T. and Shahrokhi, S., 2022. Assess groundwater quality with help of Hydrochemical parameters (Case study: in Gheydar area, Zanjan Province). Journal of Environmental Science and Technology, 24(3), pp. 289-305. (In Persian).

8- Farzi, R., Tabasinezhad, N., Ahmadi, A., Mosavi-Sabet, H., & Imanpour Namin, J. 2022. Study of the water quality parameters of the inlet and outlet water of a rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) farm on the water quality parameters in Masouleh River, Guilan province. Journal of Renewable Natural Resources Research, 13(1), pp. 13-23. (In Persian).

© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱٤۰٤، مقاله پژوهشی، ص. ۱۲٦-۱۱۳

# ارزیابی کیفیت آب رودخانه گاماسیاب با استفاده از شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در دو فصل بهار و تابستان

مریم ابراهیمیان نجف‌آبادی[۱]، علیرضا ایلدرمی[۲*]، ثمر مرتضوی[۳] و ابراهیم محمدی‌منش[۴]

۱- دانش آموخته دکترا محیط‌زیست، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ملایر.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه ملایر ، (a.ildoromi@malayeru.ac.ir).

۳- استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ملایر.

۴- دانشیار گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

## چکیده

**رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آبی مورد استفاده در بخش‌های آشامیدنی، کشاورزی و صنعت به حساب می‌آیند که استفاده از شاخص‌های اختصاصی در ارزیابی بوم‌شناسی آن‌ها امری ضروری به حساب می‌آید. بر این اساس مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثر بوم‌شناختی حضور فلزات سنگین (کروم، مس، نیکل، روی، آهن و منگنز) در آب رودخانه گاماسیاب با استفاده از شاخص آلودگی فلزات سنگین(Heavy metal Pollution Index)، شاخص فلزی (Metal Index) و شاخص ارزیابی فلزات سنگین ( Heavy metal Evaluation Index) انجام گرفت. در این پژوهش ۹۰ نمونه آب از ۱۵ ایستگاه در دو فصل بهار و تابستان از رودخانه گاماسیاب برداشت شد. پس از انتقال نمونه ها به آزمایشگاه، غلظت فلزات سنگین با دستگاه طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی ICP-OES اندازه‌گیری شد. با توجه به غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های آب، شاخص HPI برای هر دو فصل محاسبه شد. مقدار عددی شاخص HPI در فصل بهار و تابستان به‌ترتیب، ۲/٤٦- و ۳/۳٤- به‌دست آمد که این مقدار نشان دهنده عدم آلودگی آب رودخانه گاماسیاب است. بررسی شاخص MI برای ارزیابی کیفیت آب برای شرب نشان داد که در فصل بهار و تابستان آب رودخانه گاماسیاب در طبقه قابل آشامیدن قرار دارد. مقدار شاخص MI در فصل بهار ۰/۰۷۵ و در فصل تابستان ۰/۰۱ گزارش گردید. بر اساس شاخص HEI آب رودخانه گاماسیاب در فصل بهار و تابستان به‌ترتیب با مقدار عددی ۷۵ و ۱۲/۳۵ در طبقه آلودگی با درجه کم قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از سه شاخص، به قطعیت می‌توان گفت درجه آلودگی آب رودخانه گاماسیاب به فلزات سنگین کم و مشکلاتی از لحاظ بوم شناختی منطقه را تهدید نمی‌کند، اما با توجه به اهمیت بوم شناختی رودخانه گاماسیاب پیشنهاد می‌شود که در بهار با پایش کیفیت آب، مدیریت پساب صنایع، کنترل برداشت آب از رودخانه و محدود کردن استفاده از کودهای شیمیایی مانع از آلودگی آب رودخانه گاماسیاب شد.**

**کلید واژه‌ها:** آلودگی آب، اثر بوم‌شناختی، فلزات سنگین، رودخانه گاماسیاب.

### مقدمه

در میان بوم‌سازگان‌های آبی رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع اساسی تأمین آب برای مصارف گوناگون ازجمله کشاورزی، صنعت و شرب مطرح هستند که هرگونه فعالیت بشری به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر روی آن‌ها تأثیر می‌گذارد ( Majlesi et al., 2019 ). همگام با رشد و توسعه فعالیت‌های شهری، صنعتی و اقتصادی در طی چند دهه اخیر و تولید انواع مختلف ترکیبات شیمیایی، به‌طور ناخواسته آلاینده‌ها به طبیعت وارد شده که برای محیط‌زیست و انسان‌ها مشکلات و خطرات جدی به همراه داشته است (Seifi and Rahi, 2019). در حال حاضر آلودگی بوم‌سازگان‌های آبی، یکی از تهدیدهای جدی محیط‌زیستی است (Bayati et al., 2020). حفظ کیفیت منابع آب رودخانه‌ها به‌منظور تأمین آب آشامیدنی، فعالیت‌ها و کاربری‌های تفریحی و ایجاد یک بوم‌سازگان امن و مناسب برای آبزیان و حیات‌وحش رودخانه ضروری است (Zhang et al., 2021). در این راستا آگاهی از روند تغییرات کیفی آب رودخانه همراه با شناسایی عوامل اصلی آلودگی آن از اهمیت بالایی برخوردار است (Najafi et al., 2020). رودخانه گاماسیاب به‌دلیل مصارف شرب، کشاورزی و آبزی‌پروری حائز اهمیت است. تنوع زیاد گونه‌های جانوری و گیاهی در حاشیه‌ی این رودخانه و ارزش بالای آن از لحاظ اقتصادی و صیادی، اهمیت حفظ رودخانه را از آلودگی نمایان می‌نماید ( Singh et al., 2020). با پایش و ارزیابی آلودگی آب در این منطقه می‌توان کمک به حفظ رودخانه از آلودگی کرد. آلودگی آب موجب بر هم خوردن شرایط لازم برای بقای موجودات زنده وابسته به آب در حواشی رودخانه می‌گردد ( Radi and Al- Radi

Fanharawi, 2022). لذا شناسایی و کنترل آلاینده‌ها از محیط آبی برای بهبود کیفیت آب می‌تواند گامی موثر در حمایت از ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه‌ها باشد (Kapsi et al., 2019). در میان هزاران ماده آلی و غیر آلی که وارد اکوسیستم‌های آبی می‌شوند، فلزات سنگین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند ( Luo et al., 2022). فلزات سنگین به عناصر شیمیایی فلزی گفته می‌شود که دارای چگالی نسبتاً بالایی هستند. غالبا چگالی آن‌ها بیشتر از پنج گرم بر سانتی‌مترمکعب است. برخی فلزات سنگین نظیر کادمیوم، جیوه، سرب، آرسنیک و کروم حتی در غلظت‌های کم نیز برای موجودات زنده به‌عنوان عوامل سمی شناخته شده‌اند و در دراز مدت اثرات نامطلوبی به دنبال خواهند داشت ( Zhushan and Shuhua, 2020 ). یکی از اساسی‌ترین مسائل و مشکلات در ارتباط با فلزات سنگین عدم متابولیزه شدن آن‌ها در بدن می‌باشد. در واقع فلزات سنگین پس از ورود به بدن در بافت‌هایی مانند چربی، عضلات، استخوان‌ها و مفاصل رسوب کرده و انباشته می‌گردند. این امر موجب بروز بیماری‌ها و عوارض متعددی در بدن می‌شود ( Zaynab et al.,2022). فلزات سنگین همچنین جایگزین دیگر املاح و مواد معدنی مورد نیاز در بدن می‌گردند. اختلالات عصبی، انواع سرطان، اختلالات تنفسی، قلبی-عروقی، آسیب به کبد، کلیه‌ها و مغز، برهم خوردن تعادل هورمون‌ها، سقط جنین، التهاب مفاصل، پوکی استخوان و در موارد حاد مرگ از نتایج و اثرات ورود فلزات سنگین به بدن می‌باشد (Thukral and Rodrigo-Comino, 2020). در موجودات تولید کننده از جمله گیاهان نیز، اثرات سمیت فلزات سنگین ممکن است به‌صورت جلوگیری از تولید کلروفیل، فتوسنتز و رشد بروز پیدا کرد. فلزات سنگین با اختلال در زنجیره انتقال الکترون و جایگزین شدن به جای منیزیم در مولکول‌های کلروفیل، فعالیت فتوسنتز در گیاهان را با نقصان رو به رو می‌سازد ( Zhang et al., 2021). ورود فلزهای سمی به یک بوم‌سازگان آبی توسط منابع انسانی و طبیعی سبب می‌شود که بخش زیست‌شناسی آن‌ها مقصد نهایی فلزهای سنگین منتقل شده باشد ( Huihui et al., 2020). احتراق سوخت‌های فسیلی، معدن‌کاری، زائدات شهری و صنعتی، فاضلاب، کودها و آفت‌کش‌ها ازجمله منابع انسانی ورود فلزات سنگین به آب به شمار می‌روند ( Gholizadeh and Zibaei, 2020). آلودگی به فلزهای سمی، زنجیره غذایی و درنهایت سلامت و بهداشت جامعه انسانی را تهدید می‌کند ( Farzi et al., 2022). با استفاده از تعیین غلظت کلی فلزات سنگین نمی‌توان نتایج قابل اعتمادی از خطرات بوم شناختی ناشی از فلزات سنگین به‌دست آورد(Vukosav et al., 2014) . لذا شاخص‌های کیفی ارائه شده برای برآورد سمیت فلزات سنگین، کمک زیادی در برآورد خطرات بوم‌شناختی آلاینده‌ها می‌کنند (Jaiswal et al., 2018) تعدادی از شاخص‌های کیفیت برای تخمین ویژگی‌های آب سطحی به‌وسیله پارامترهای کیفیت آب توسعه یافته است (Jaffari and Hasanzadeh, 2019). در کنار روش‌های آماری استفاده از شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت آب می‌تولند اطلاعات مناسبی در اختیار محقق قرار دهد. شاخص‌ها با ساده‌سازی و کاهش اطلاعات خام اولیه علاوه بر بیان کیفیت آب، روند تغییرات کیفی آب در مکان و زمان را نشان می‌دهند (Abbasi and Abbasi, 2011). در این روش اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌های کیفی آب به یک عدد منفرد و بدون بعد تبدیل می‌شود که در یک مقیاس درجه‌بندی شده مفهوم و تفسیر کیفی تعریف شده‌ای دارد (Khalaji et al., 2017). شاخص کیفیت، یک عدد بدون واحد است که میزان کیفیت مربوط به اجماع یکسری از پارامترهای اندازه‌گیری شده را بیان می‌کند ( Nguyen et al., 2021). در سال‌های اخیر مطالعه‌های زیادی در زمینه ارزیابی فلزات سنگین در بوم‌سازگان‌های آبی صورت گرفته است. شاخص کیفیت به‌عنوان یک کیفیت کلی تعریف می‌شود که منعکس کننده تاثیر مرکب تعدادی از ویژگی‌های کیفیت فردی است. Vinther et al., (2014) بررسی غلظت فلزات سنگین آرسنیک، سرب، کادمیوم، کروم، جیوه، مس و روی در رود ون تانگ چین پرداختند. در این پژوهش برای ارزیابی خطرات احتمالی فلزات سنگین، شاخص آلودگی فلزات سنگین( HPI) مورد استفاده قرار گرفته شد که تمامی مقادیر(HPI) کمتر از حد بحرانی ۱۰۰ به‌دست آمده است. این عدد نشان‌دهنده‌ی حد قابل قبولی از آلودگی اکولوژیکی رود ون تانگ است که با توجه به خطرات بالای ناشی از وجود فلزات سنگین، کنترل آلودگی و ورود آلاینده به رودخانه دارای اهمیت است. در مطالعه‌ای Bayati et al., (2020)به بررسی آلودگی آب تالاب چغاخور به فلزات آرسنیک، مس، کروم، سرب، روی و کادمیوم با استفاده از شاخص‌های مختلف پرداختند نتایج حاصل از بررسی شاخص HPI نشان داد که تالاب چغاخور به فلزات سنگین آلوده نیست. Asgharimoghddami et al., (2020) به بررسی شاخص آلودگی فلزات سنگین نمونه آب از چاه‌های دشت نقده به منظور شناخت کیفیت کلی منابع آب زیرزمینی، بر پایه غلظت شش فلز سنگین پرداختند. شاخص HPI کلی دشت نقده مقدار ۲۳/۲۴ به‌دست آمد که این مقدار پایین‌تر از مقادیر بحرانی آن (۱۰۰) می‌باشد. در خارج از کشور نیز Appiah-Opong et al (2021) به ارزیابی تغییرات فصلی در غلظت فلزات سنگین مس، سرب، روی و جیوه در امتداد ساحل جنوب غربی غنا پرداختند. نتایج بررسی شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) نشان داد که غلظت عناصر فراتر از سطح بحرانی (۱۰۰) می‌باشد و آب آن منطقه برای آشامیدن مناسب نیست. Li et al. (2020) به بررسی فلزات سنگین رودخانه سونگ هوا در چین پرداختند. در این پژوهش از شاخص آلودگی فلزات سنگین استفاده شد که نتایج حاصل از این شاخص نشان داد که آب این رودخانه برای تمام فلزات

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45557.2108

کمتر از سطح بحرانی (۱۰۰) قرار دارد. Sahoo و Swain (2020) به بررسی فلزات سنگین با استفاده از شاخص HPI در ۶۰ ایستگاه از آب سطحی شبه‌جزیره‌ی هند پرداختند. پس از مقایسه نتایج با استانداردهای جهانی نتایج نشان داد که آب این ایستگاه‌ها برای آشامیدن و کشاورزی در محدوده استاندارد قرار دارد. باتوجه به اهمیت بررسی فلزات سنگین در منابع آبی، این پژوهش با هدف ارزیابی اثر بوم‌شناختی حضور فلزات سنگین ( کروم، مس، نیکل، روی، آهن و منگنز) در آب رودخانه گاماسیاب با استفاده از شاخص آلودگی فلزات سنگین ( Heavy metal Pollution Index)، شاخص فلزی (Metal Index) و شاخص ارزیابی فلزات سنگین (Heavy metal Evaluation Index) انجام گرفت. در این پژوهش شاخص‌های مذکور در دو فصل پرآب و کم آب (بهار و تابستان) مورد بررسی قرار گرفتند. زمان نمونه‌برداری در این پژوهش، بر اساس میانگین تغییرات دبی آب رودخانه گاماسیاب در سال‌های گذشته، مشخص گردید. بررسی میانگین دبی آب رودخانه گاماسیاب نشان داد که در اواسط خرداد ماه به‌دلیل بارندگی‌های فصلی و بالا بودن حجم آب ورودی به گاماسیاب، دبی به بالاترین مقدار و در فصل تابستان در اواسط شهریور ماه به کمترین مقدار می‌رسد، لذا پس از بررسی اطلاعات هواشناسی در شهریور ماه، دو روز قبل از شروع اولین بارش در اواسط شهریور ماه، نمونه‌برداری مربوط به فصل تابستان (کم آب) و پس از آخرین بارندگی در اواسط خرداد ماه، نمونه برداری فصل بهار (پرآب) صورت گرفت و با استفاده از بازه زمانی و مکانی، به‌طور همزمان تغییرات غلظت فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

نمونه‌برداری در سال ۹۸ طی دو فصل کم آب ( تابستان) و پر آب ( بهار) از آب، از ایستگاه‌های مشخص شده در شکل (۱) از رودخانه‌ی گاماسیاب با سه تکرار صورت گرفت. در مجموع از ۱۵ ایستگاه طی هر فصل ۴۵ نمونه آب برداشت شد. برای آماده‌سازی نمونه آب، میزان ۱۰۰ گرم از نمونه را داخل بشر ریخته شد و پنج سی‌سی اسید نیتریک ۶۵ درصد Merck به آن اضافه گردید. نمونه را بر روی هیتر قرار داده تا حجم آن به کمتر از ۱۰ الی ۲۰ سی‌سی برسد و بعد از هضم کامل نمونه با استفاده از آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد. در آخر غلظت نمونه شاهد و نمونه‌های هضم شده با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی ICP-OES به‌دست آمد (APHA, 2005). نتایج با استفاده از نرم‌افزارهای آماری IBM SPSS 17 و Excle، داده‌ها، با توجه به نرمال و غیرنرمال بودن، توسط آزمون‌های مربوطه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند. نرمال بودن یا نبودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف بررسی شد (Janisarnavi and Shahrokhi, 2022) . سپس برای مقایسه نتایج دو فصل از مقایسه میانگین( آزمون من‌ویتنی‌یو) و برای مقایسه ایستگاه‌های مختلف از آزمون ناپارامتریک کروسکال والیس استفاده گردید. برای بررسی ارتباط بین پارامترها از ضریب همبستگی مربوطه استفاده شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excle ترسیم شدند.

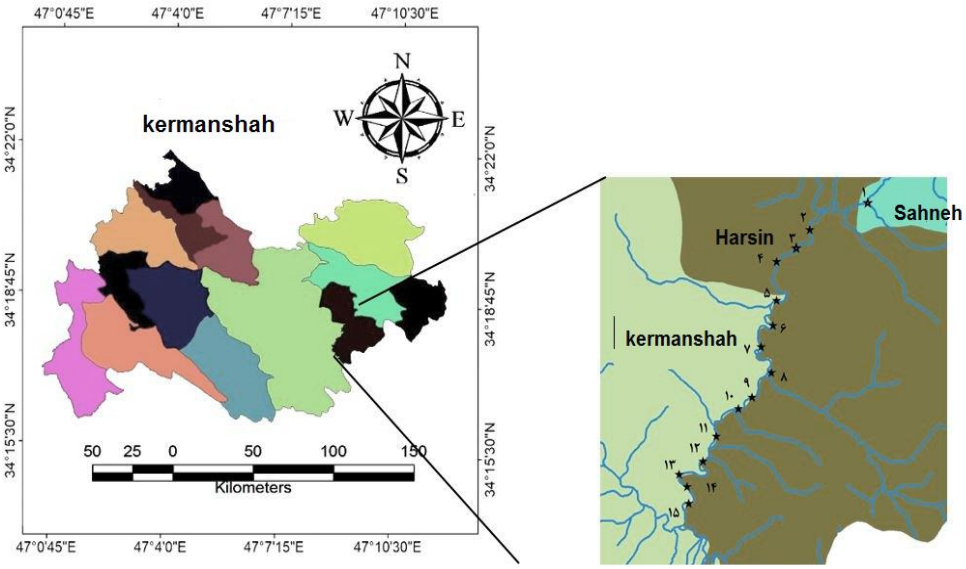



**Fig. 1- Study area and study stations**

**شکل۱- نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری**

**شاخص‌های ارزیابی آلودگی**

ارزیابی اثر بوم شناختی انواع آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های اختصاصی، در منابع آبی امری ضروری است. شاخص‌ها اطلاعاتی را که در مجموعه داده‌ها وجود دارد در یک مقدار عددی خلاصه می‌کنند. به‌منظور محاسبه آلودگی فلزات سنگین از شاخص ارزیابی فلزات سنگین ( Heavy Metal Pollution Index) شاخص فلزی (Metal Index) و شاخص ارزیابی فلزات سنگین (Heavy metal Evaluation Index) استفاده شد. . شاخص HPI یک روش برای رتبه‌بندی کیفیت آب بر اساس فلزات سنگین است که با استفاده از آن می‌توان اثر فلزات سنگین را بر انسان مورد بررسی قرار داد (Asomaku, 2023). با استفاده از این شاخص می‌توان نسبت به رتبه‌بندی کیفیت آب بر اساس آلودگی فلزات سنگین اقدام کرد (Ajibare et al., 2022). اگر مقادیر به‌دست آمده برای HPI کمتر از ۱۰۰ باشد اب فاقد آلودگی به فلزات سنگین و بیشتر از ۱۰۰ آب آلوده به فلزات سنگین است و مساوی ۱۰۰ آب در آستانه خطر آلودگی به فلزات سنگین قرار دارد. برای بررسی شاخص ارزیابی فلزات سنگین از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود.

$$HPI = \frac{\sum_{i-1}^{n} W_i\, Q_i}{\sum_{i-1}^{n} W_i} \qquad (۱)$$

که در این رابطه:

Wi: نسبت وزنی i ام مؤلفه می‌باشد که معکوس استاندارد می‌باشد.( Wi=1/Si)

Qi: زیر شاخص عنصر مورد ارزیابی است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = \sum_{i-1}^{n} \frac{\{M_i(-)I_i\}}{(S_i - I_i)} \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن:

$Mi$: غلظت قرائت شده عنصر (µg/L)

$Ii$: غلظت ایده آل عنصر موردنظر

Si: رهنمود سازمان بهداشت جهانی(WHO)

برای محاسبه شاخص فلزی (Metal Index) و تعیین آلودگی منابع آب ازنظر فلزات سنگین باید غلظت‌های به‌دست آمده از فلزات را با بیشترین حد مجاز یک عنصر فلزی در حالت استاندارد مورد مقایسه قرارداد ( Gad et al., 2022). برای محاسبه شاخص فلزی از رابطه (۳) استفاده شد.

$$MI = \sum \frac{C}{(MAC)} \qquad (۳)$$

که در آن:

C: غلظت هریک از عناصر در محلول

(MAC) Maximum Acceptable Concentration : بیشترین حد مجاز برای یک عنصر فلزی در حالت استاندارد

*i*: شماره عنصر است.

اگر مقادیر به‌دست آمده برای MI کمتر از یک باشد(MI<1) آب قابل آشامیدن است.

اگر مقادیر به‌دست آمده برای MI بیشتر از یک باشد(1<MI) آب غیر قابل آشامیدن است.

اگر مقادیر به‌دست آمده برای MI برابر یک باشد(1=MI) آب در آستانه خطر است.

برای محاسبه شاخص ارزیابی فلزات سنگین، مقدار قرائت شده برای عناصر با حداکثر غلظت مجاز هر یک از عناصر در آب مورد ارزیابی، مقایسه می‌شود. رابطه (۴) نحوه محاسبه شاخص ارزیابی فلزات سنگین(Heavy metal Evaluation Index) را نشان می‌دهد(Rahman et al., 2020) .

$$HEI = \sum_{i=1}^{n} \frac{H_c}{H_{mac}} \qquad (۴)$$

که در آن:

Hc غلظت قرائت شده عنصر مورد ارزیابی(ppb)

Hmac حداکثر غلظت مجاز هر عنصر مورد ارزیابی(ppb)

اگر مقادیر بدست آمده برای شاخص ارزیابی فلزات سنگین(HEI) کمتر از ۴۰۰ باشد درجه آلودگی کم است.

اگر مقادیر بدست آمده برای شاخص ارزیابی فلزات سنگین(HEI) بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ باشد درجه آلودگی متوسط است.

اگر مقادیر بدست آمده برای شاخص ارزیابی فلزات سنگین(HEI) بیشتر از ۸۰۰ باشد درجه آلودگی بالا است.

## نتایج و بحث

در این پژوهش غلظت فلزات سنگین آب رودخانه گاماسیاب برای ارزیابی آلودگی آب رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۱) آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در رودخانه گاماسیاب در دو فصل بهار و تابستان را ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج مشخص شد که در فصل بهار بیشترین غلظت‌ها به‌ترتیب مربوط به آهن> روی> کروم> نیکل > منگنز> مس و در فصل تابستان بیشترین غلظت‌ها به‌ترتیب مربوط آهن> منگنز> مس> روی> نیکل> کروم می باشد. بالا بودن فلز آهن در ایستگاه‌های مورد مطالعه در هر دو فصل را می‌توان به منشا زمین‌زاد نسبت داد. غلظت فلزات سنگین آب رودخانه گاماسیاب در ۱۵ ایستگاه نمونه‌برداری در فصل بهار و تابستان شکل (۲ و ۳) نشان داد که در فصل بهار غلظت کروم، مس، روی، آهن، نیکل و منگنز در ایستگاه شماره شش به‌ترتیب با مقدار ۰/۰۰۵ ، ۰/۰۰۶ ، ۰/۰۱۲، ۰/۰۰۵ ، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۰۱ کمتر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین دلایل پایین بودن غلظت فلزات سنگین در این ایستگاه، تلاقی رودخانه دینور آب به رودخانه گاماسیاب می‌باشد. رودخانه دینور آب در فاصله‌ای بین ایستگاه

DOI: 10.22055/jise.2024. 45557.2108

شماره پنج و شش به رودخانه گاماسیاب سرازیر می‌شود که موجب کاهش غلظت فلزات سنگین و بار آلودگی در این ایستگاه می‌شود. در فصل تابستان مجموع میانگین غلظت فلزات سنگین ایستگاه چهار نسبت به سایر ایستگاه‌ها کمتر می‌باشد. در این ایستگاه فلز کروم، آهن و منگنز غلظت کمتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها دارند. که با توجه به منشا زمین‌زاد بودن این فلزات می‌توان گفت که کاهش آشفتگی آب موجب کاهش حضور این عناصر درون آب رودخانه می‌شود و فلزات سنگین فرصت بیشتری برای ته نشینی دارند. از طرفی نتایج نشان داد که غلظت فلزات سنگین مس، نیکل و روی در فصل تابستان در ایستگاه یازده غلظت نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیشتر است که با توجه به غالب بودن کاربری کشاورزی در این ایستگاه، می‌توان این افزایش غلظت را به افزایش استفاده از کودهای شیمیایی حاوی این عناصر نسبت داد.

**جدول ۱- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در رودخانه گاماسیاب( بر حسب ppm)**

**Table 1- Descriptive statistics of heavy metal concentration in Gamasiab river(ppm)**

| Heavy Metals | | Mn | Fe | Zn | Ni | Cu | Cr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mean | spring | 0.1±0.124 | 1.7±5.48 | 0.05±0.536 | 0.06±0.215 | 0.2±0.021 | 0.14±0.52 |
| | summer | 0.02±0.27 | 0.6±0.98 | 0.5±0.22 | 0.01±0.013 | 0.6±0.4 | 0.003±0.008 |
| Minimum | spring | 0.001±0.001 | 0.004±0.01 | 0.001±0.004 | 0.003±0.01 | 0.004±0.005 | 0.001±0.002 |
| | summer | 0.001±0.001 | 0.01±0.12 | 0.002±0.02 | 0.001±0.004 | 0.002±0.014 | 0.001±0.004 |
| Maximum | spring | 0.02±0.76 | 0.03±6.41 | 0.2±0.41 | 0.003±0.26 | 0.001±0.19 | 0.015±0.63 |
| | summer | 0.02±0.091 | 0.001±3.09 | 0.003±2.41 | 0.003±0.57 | 0.002±0.38 | 0.001±0.018 |

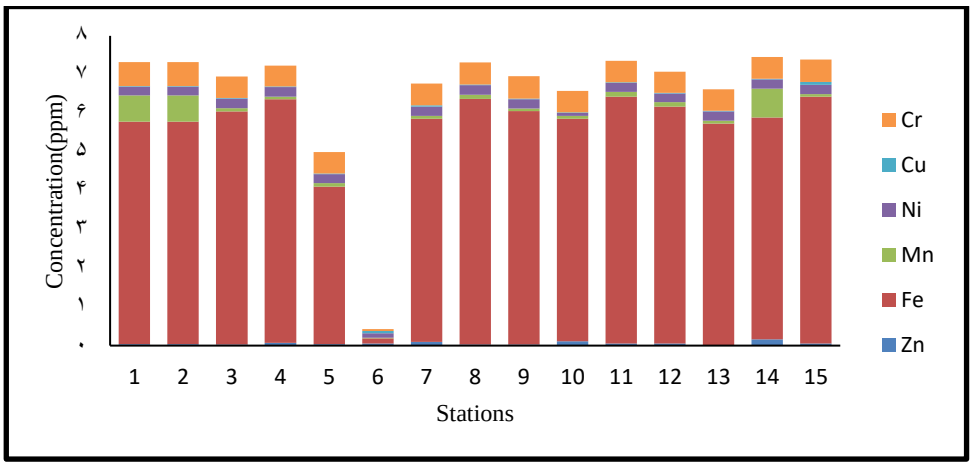



**Fig. 2- Heavy metal concentration of Gamasiab river in Spring**

**شکل۲- غلظت فلزات سنگین در فصل بهار در آب رودخانه گاماسیاب**

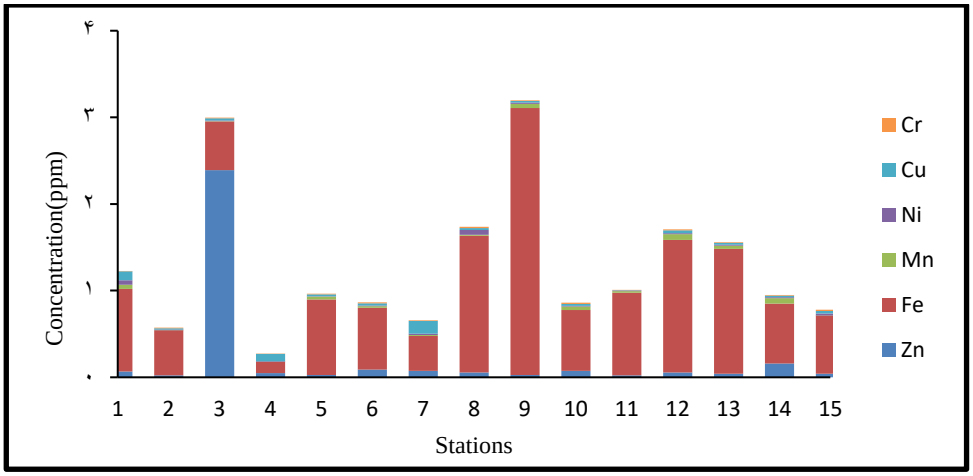



**Fig. 3- Heavy metal concentration of Gamasiab river in Summer**

**شکل۳- غلظت فلزات سنگین در فصل تابستان در آب رودخانه گاماسیاب**

**جدول ۲ - مقایسه فلزات سنگین در رودخانه گاماسیاب با سایر مطالعات مشابه**

**Table 2- Compare of Gamasiab River heavy Metals by similar studies**

| Study Area | Reference | Metal | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mn | Fe | Zn | Ni | Cu | Cr |
| Behesht Abad | (Najafi et al., 2020) | - | - | 17.08 | - | 2.24 | 2.03 |
| Gong River | (Ansari, 2023) | - | 6.033 | 15.7 | 0.485 | 0.642 | 1.851 |
| Naser Lacke | (Rizk et.,al 2022) | - | - | 7.13 | - | 0.8 | - |
| Yamuna River | (Asim and Nageswar, 2021) | - | 115 | 1300 | 160 | 85 | 43 |
| Recent Study | Spring | 0.124 | 5.48 | 0.536 | 0.215 | 0.021 | 0.52 |
| | Summer | 0.27 | 0.98 | 0.22 | 0.013 | 0.4 | 0.008 |

**جدول ۳-آمار توصیفی شاخص HPI در آب رودخانه گاماسیاب**

**Table 3- Statistical Analysis of HPI index in Gamasiab river**

| Heavy Metals | Season | Mean(mg/L) (Mi) | STD (Si)(µg/L) | *(Wi) (Qi) | Quality Index (Qi) | Weight Index (Wi) | Ideal amount (Ii) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cr | Spring | 0.52±0.001 | 500 | -0.021 | -10.99 | 0.002 | 50 |
| | Summer | 0.008±0.3 | | -0.022 | -11.1 | | |
| Cu | Spring | 0.021±0.002 | 1000 | -0.00526 | -5.26 | 0.001 | 50 |
| | Summer | 0.4±0.01 | | -0.00522 | -5.22 | | |
| Ni | Spring | 0.215±0.02 | 20 | 0.053 | 1.075 | 0.05 | - |
| | Summer | 0.013±0.06 | | 0.0032 | 0.065 | | |
| Zn | Spring | 0.536±0.003 | 15000 | -0.00299 | -49.99 | 0.00006 | 5000 |
| | Summer | 0.22±0.1 | | -0.00299 | -49.997 | | |
| Fe | Spring | 5.48±0.02 | 2000 | 0.00135 | 0.27 | 0.0005 | - |
| | Summer | 0.98±0.003 | | 0.0024 | 0.049 | | |
| Mn | Spring | 0.124±0.02 | 300 | -0.164 | -49.93 | 0.0033 | 100 |
| | Summer | 0.27±0.004 | | -0.164 | -49.86 | | |

HPI Spring = -2.46 HPI Summer =-3.34

در فصل بهار غلظت تمام عناصر به جز فلز منگنز و مس، بیشتر از فصل تابستان گزارش شد. افزایش بارندگی و نزولات جوی در فصل بهار منجر به افزایش رواناب‌هایی می‌شود که از خشکی‌ها و زمین‌های اطراف صنایع، جاده‌ها، اراضی کشاورزی و غیره حجم بالایی از آلاینده‌ها به‌خصوص فلزات سنگین را به نواحی رودخانه سرازیر می‌کنند. به‌منظور افزایش دقت، نمونه‌های مورد بررسی در آب رودخانه گاماسیاب در دو فصل بهار و تابستان با برخی مطالعه‌های صورت گرفته در ایران و جهان مورد مقایسه قرار گرفت. که در جدول (۲) این مقادیر ارائه شده است. غلظت فلزات موجود در نمونه آب رودخانه گاماسیاب از سایر مطالعه‌های مشابه در سایر مناطق در اغلب موارد مقادیر کمتری را نشان داد. همان‌طور که اشاره شد برای تعیین اثر فلزات سنگین بر سلامت انسان از شاخص آلودگی فلزات سنگین استفاده می‌شود. برای این منظور باید غلظت اندازه‌گیری شده فلزات را با غلظت ایده‌آل و استانداردهای سازمان بهداشت جهانی مقایسه کرد (Farzi et al., 2022).

مقادیر محاسبه شده برای شاخص آلودگی فلزات سنگین در جدول (۳) ارائه شده است. میانگین عددی شاخص HPI برای فصل بهار ۲/۴۶- و فصل تابستان ۳/۳۶- به‌دست آمد. همان‌طور که اشاره شد این شاخص تأثیر مجموعه‌ای از فلزات مختلف را بر کیفیت آب مورد بررسی قرار می‌دهد (Seifi and Riahi, 2019). نتایج نشان داد که به‌طور میانگین آب رودخانه گاماسیاب از نظر شاخص HPI فاقد آلودگی به فلزات سنگین می‌باشد. این موضوع به‌دلیل بالا بودن دبی آب رودخانه گاماسیاب و خود پالایی آن در طول مسیر می باشد. خودپالایی رودخانه‌ها از جمله مهم‌ترین عوامل در حذف آلاینده‌ها از آب می‌باشد که با توجه به مشکلات کم آبی اخیر و کمبود بارش‌ها شاهد کاهش دبی رودخانه، تواتر و به دنبال آن کمتر شدن اثر خودپالایی هستیم. قابلیت خودپالایی و اضمحلال آلودگی در رودخانه بستگی به شرایط آن از لحاظ فصلی و موقعیت زمانی طی شبانه روز دارد. شرایط فصلی به لحاظ تغییرات در میزان آورد رودخانه ازجمله پارامترهای مؤثر بر رفتار خودپالایی رودخانه می‌باشند (Ghezelsofloo et al., 2021). در فصل تابستان به‌علت برداشت بیش از حد آب از رودخانه، ماندابی شدن آب و آلودگی فیزیکی آب، کیفیت آب کاهش می‌یابد.,.Farasati et al (2020) در بررسی کیفیت آب حوضه گرگان‌رود نشان دادند که از تیر ماه تا مهرماه به‌دلیل کاهش بارندگی، برداشت زیاد از آب رودخانه، ورود زهکش‌های اراضی کشاورزی و همچنین

*DOI:* 10.22055/jise.2024. 45557.2108

فاضلاب‌های شهرهای واقع در مسیر رودخانه غلظت آلودگی افزایش یافته است. تأثیرات کاربری اراضی در طول رودخانه نیز ارتباط مستقیمی با عوامل آلوده‌ساز منطقه و تغییرات شاخص‌های فیزیکی شیمیایی دارد (Sargholzaei et al., 2017). با توجه به طویل بودن رودخانه گاماسیاب، انواع کاربری‌ها ازجمله کاربری مسکونی، آبزی پروی،کشاورزی، و صنعتی در اطراف رودخانه گاماسیاب وجود دارد که پسماندهای شیمیایی و پساب صنایعی از جمله صنعت سیمان، کارخانه قند، کشتارگاه صنعتی، کارگاه کاشی– سازی و صنعت پتروشیمی بیستون موجب افزایش آلودگی آب رودخانه و کاهش کیفیت آن می‌شود.

آمار توصیفی حاصل از محاسبه شاخص فلزی(Metal Index) در جدول (۴) ارائه شده است. بررسی عددی شاخص MI در دو فصل بهار و تابستان به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۷۵ و ۰/۰۱ نشان داد که آب رودخانه گاماسیاب از لحاظ آلودگی به فلزات سنگین در طبقه قابل شرب قرار دارد.

برای محاسبه شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI) ، غلظت بدست آمده برای هر عنصر با حداکثر غلظت مجاز هر یک از عناصر در آب ، مقایسه می‌شود. نتایج نشان داد در دو فصل بهار و تابستان به‌ترتیب ۷۵ و ۱۲/۳۵ می‌باشد که این مقدارکمتر از مقدار آستانه خطر(۴۰۰) بود. مقادیر به‌دست آمده برای شاخص بیان شده، در جدول (۵) ارائه شده است. جدول (۶) و (۷) نتایج حاصل از بررسی همبستگی بین فلزات سنگین در آب رودخانه گاماسیاب در فصل بهار و تابستان را نشان می‌دهد. فلزات سنگین در فصل بهار ارتباط معنی داری در سطح ۰/۰۱ برای فلز کروم با نیکل، کروم با آهن، نیکل با آهن و روی با منگنز نشان داد. همبستگی مثبت بین این فلزات می‌تواند نشان از منشأ مشترک این فلزات داشته باشد. بیشترین ارتباط در فصل بهار بین فلز کروم و نیکل و کمترین آن بین دو فلز روی و منگنز به‌دست آمد. همچنین نتایج حاصل از همبستگی بین غلظت فلزات سنگین در فصل تابستان نشان داد که ارتباط معنی داری در سطح ۰/۰۱ بین دو فلز آهن و منگنز وجود دارد که این موضوع را نیز می‌توان به منشأ طبیعی و یکسان آن ها نسبت داد.

میانگین غلظت فلزات سنگین در مقایسه با سازمان جهانی بهداشت (WHO) نشان داد که غلظت عنصر آهن، کروم و نیکل در فصل بهار و غلظت مس در فصل تابستان فراتر از حد مجاز می‌باشد. کروم از عناصر آلوده کننده‌ای است که نفوذ آن در آب می‌تواند ناشی از استفاده کودهای شیمیایی در فعالیت‌های کشاورزی، رسوب‌های آلوده اتمسفری ناشی از کارخانجات صنعتی و پساب فعالیت‌های صنعتی یا معادن باشد ( Ghalandarzadeh et al., 2020). از این رو احتمال می‌رود علاوه‌بر خصوصیات زمین‌شناسی، فعالیت‌های انسانی (فعالیت‌های کشاورزی و فاضلاب انسانی) یکی از دلایل تأثیرگذار بر میزان غلظت کروم در منطقه باشد (Asomaku, 2023). وجود کاربری‌های صنعتی ازجمله کارخانه سیمان و کارگاه‌های کاشی‌کاری در حاشیه رودخانه گاماسیاب و تخلیه فاضلاب این صنایع به آب رودخانه موجب افزایش غلظت کروم در آب می‌گردد. Zoqi et al (2023) پس از بررسی لجن کارخانه کاشی و سرامیک بیرجند، نشان دادند که مقدار قابل توجهی فلز سنگین کروم و سرب در پساب خروجی این صنعت وجود دارد.

**جدول ٤- آمار توصیفی شاخص فلزی(MI) در آب رودخانه گاماسیاب**

**Table 4- Descript Statistical of Metal Index in Gamasiab River**

| Pollution Rate by MI index | Mean | Season |
|---|---|---|
| Drinkable | 0.075 | Spring |
| Drinkable | 0.01 | Summer |

**جدول ٥- آمار توصیفی شاخص ارزیابی فلزات سنگین(HEI) در آب رودخانه گاماسیاب**

**Table 5- Descript Statistical of Metal Index in Gamasiab River**

| Season | Mean | Pollution rate by HEI index |
|---|---|---|
| Spring | 75 | Low pollution |
| Summer | 12.35 | Low pollution |

**جدول ٦- نتایج همبستگی بین غلظت فلزات سنگین در آب رودخانه گاماسیاب در فصل بهار**

**Table 6- Correlation results between the concentration of heavy metals in Gamasiab water river in spring**

| Metal | Cr | Cu | Ni | Zn | Fe | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cr | 1 | | | | | |
| Cu | 0.155 | 1 | | | | |
| Ni | **0.835 | 0.165 | 1 | | | |
| Zn | 0.189 | 0.057 | 0.178 | 1 | | |
| Fe | **0.836 | 0.173 | **0.75 | 0.199 | 1 | |
| Mn | 0.184 | -0.049 | 0.233 | **0.516 | 0.156 | 1 |

**correlation in 0.01%

**جدول ۷- نتایج همبستگی بین غلظت فلزات سنگین در آب رودخانه گاماسیاب در فصل تابستان**

**Table 7- Correlation results between the concentration of heavy metals in Gamasiab Water river in Summer**

| Metal | Cr | Cu | Ni | Zn | Fe | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cr | 1 | | | | | |
| Cu | -0.151 | 1 | | | | |
| Ni | -0.121 | 0.256 | 1 | | | |
| Zn | -0.134 | -0.069 | -0.129 | 1 | | |
| Fe | 0.149 | -0.189 | 0.115 | -0.192 | 1 | |
| Mn | 0.132 | -0.086 | 0.237 | -0.195 | **0.447 | 1 |

**correlation in 0.01%

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بررسی آلودگی آب رودخانه گاماسیاب به فلزات سنگین، نمونه‌برداری در دو فصل بهار و تابستان صورت گرفت و غلظت فلزات سنگین کروم، مس، نیکل، روی، آهن و منگنز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، بین غلظت فلزات مورد بررسی در آب رودخانه گاماسیاب اختلاف معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ وجود دارد. در فصل بهار غلظت کروم، مس، روی، آهن، نیکل و منگنز در ایستگاه شماره شش به دلیل تلاقی رودخانه دینور آب به گاماسیاب کمتر از سایر ایستگاه‌ها بدست آمد. در فصل تابستان مجموع میانگین غلظت فلزات سنگین با منشأ زمین زاد به دلیل کاهش آشفتگی آب و درنتیجه کاهش محلول شدن عناصر در آب، کمتر از فصل بهار می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای شاخص HPI پس از بررسی تاثیر مجموعه‌ای از فلزات مختلف بر کیفیت آب، نشان داد که به‌طور میانگین آب رودخانه گاماسیاب از نظر شاخص HPI فاقد آلودگی به فلزات سنگین می‌باشد. غلظت فلزات سنگین در دو فصل بهار و تابستان بر اساس شاخص HEI کمتر از مقدار آستانه خطر(۴۰۰) به‌دست آمد. همچنین بررسی عددی شاخص MI در دو فصل بهار و تابستان نشان داد که آب رودخانه گاماسیاب از لحاظ آلودگی به فلزات سنگین در طبقه قابل شرب قرار دارد. . این فلزات گرچه در آب به میزان کمی وجود دارد اما تجمع بیش از حد آن‌ها می‌تواند به آبزیان صدمه وارد کند لذا پایش مستمر کیفیت آب رودخانه و بررسی سایر آلاینده‌های فیزیکوشیمیایی در رودخانه گاماسیاب پیشنهاد می‌گردد.

## سپاسگزاری

از همکاری آزمایشگاه گروه محیط زیست دانشگاه ملایر به‌منظور همکاری این پژوهش صمیمانه تشکر می‌نماییم.

## References

1- Abbasi, T. and Abbasi S.A., 2011. Water quality indices based on bioassessment. *The Biotic Indices. Journal of Water and Health, 9(2)* , pp. 330-348. https://doi.org/10.2166/wh.2011.133. (in Persian).

2- Ajibare, A., Ogungbile, P. and Ayeku, P., 2022. Evaluation of water pollution monitoring for heavy metal contamination: A case study of Agodi Reservoir, Oyo State, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment, 194(10)*, pp. 675- 693.

3- Ansari, A., 2023. Evaluation of heavy metal pollution index considering health risk in complete stretch of Ganga River. *Innovative Infrastructure Solutions, 8(3)*, pp. 98-115.

4- APHA, AWWA, WPCF. 2005. Standard Methods for Examination of Water and Waste Water. *Washington: American Public Health Association*. pp. 1000-3000.

5- Appiah-Opong, R., Ofori, A., Ofosuhene, M., 2021. Heavy metals concentration and pollution index (HPI) in drinking water along the southwest coast of Ghana. *Applied Water Science. 11( 57)*, pp. 265-273.

6- Asgharaimoghaddam, A., Nadiri, A. A. and Sadeghi Aghdam, F., 2020. Investigation of hydrogeochemical characteristics of groundwater of Naqadeh plain aquifer and heavy metal pollution index (HPI). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 29(115)*, pp. 97-110. https://doi.org/10.22071/gsj.2018.127310.1464 (in Persian).

7- Asim, M., and Nageswara, K., 2021. Assessment of heavy metal pollution in Yamuna River, Delhi-NCR, using heavy metal pollution index and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment, 193(2)*, pp. 103-120.

8- Asomaku, S.O., 2023. Quality assessment of groundwater sourced from nearby abandoned landfills from Industrial City in Nigeria: Water pollution indices approach. *HydroResearch, 6(2)*, pp. 130-137. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.03.002.

9- Bayati, S., Zamani Ahmadmahmoodi, R., and MafiGholami, D., 2020. Water Quality Assessment of the Choghakhor Wetland for Heavy Metals Using MI, HPI, HEI, Cd and RWQIST Indices. *Iranian Journal of Ecohydrology, 7(4),* pp. 1021-1031. DOI: 10.22059/ije.2020.309854.1382.(in Persian).

10- Farzi, R., Tabasinezhad, N., Ahmadi, A., Mosavi-Sabet, H. and Imanpour Namin, J., 2022. Study of the water Fathi, E., Zamani-ahmadmahmoodi, R., & Zare Bidaki, R. 2018. Water Quality Assessment of Beheshtabad River at the intersection of Shalamzar Spring with Koohrang River. *Environment and Water Engineering, 4(2)*, pp.178-183.( in Persian).

11- Farasati, M., Ghaziyani, S., Heshmatpour, A., Rostami, F., 2020. Quality Assessment of Gorganrood River Using NSFWQI Index in Gonbad kavus Urban Area. *Iranian Journal of Ecohydrology, 7(2 )*, pp. 373-382. https://doi.org/10.22034/jewe.2018.105969.1200. (in Persian)

12- Gad, M., Saleh, A., Hussein, H., Farouk, M., and Elsayed, S., 2022. Appraisal of surface water quality of nile river using water quality indices, spectral signature and multivariate modeling. *Journal of Water 14(7),* pp. 1131. https://doi.org/10.3390/w14071131.

13- Ghalandarzadeh, f., Rezaei Tavabe, K., Haji, R., Shirazi, M. and Samadi Kuchaksaraei, B., 2020. Heavy metal (cadmium, chromium, zinc) evaluation of water and sediment, and assessing the biological value index (Z) in Karaj River, *Journal of Fisheries( Iranian Journal of Natural Resources), 73(2)* pp. 199–212. (in Persian).

14- Ghezelsofloo, A. A., Eftekhari, M., & Akbari, M. 2021. Evaluation of River Self - Purification Behavior Using One - Dimensional Numerical Modeling. *Iranian journal of Ecohydrology, 8(1),* pp. 29-43. DO: . 10.22059/ije.2020.308851.1376 .(in Persian).

15- Gholizadeh, M., & Zibaei, M. (2020). Hydrochemical assessment of Chehelchai river water, Golestan province for drinking and agricultural purposes. Iranian Journal of Health and Environment, 13(2), 283-298.(in Persian).

16- Huihui, Z., Xin, L., Zisong, X., Yue, W., Zhiyuan, T., Meijun, A., and Guangyu, S., 2020. Toxic effects of heavy metals Pb and Cd on mulberry( Morus alba L.) seedling leaves: Photosynthetic function and reactive oxygen species( ROS) metabolism responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety. 195(1),* pp. 110469.DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110469.

17- Jaffari, F. and Hassanzadeh, N., 2019. Ecological quality assessment of Anzali wetland for heavy metals using heavy metals pollution index (HPI), *Iranian Journal of Health and Environment, 12(2)*, pp. 173-184. (in Persian).

18- Jaiswal, A., Arpit, V., and Pallavi, J., 2018. Detrimental effects of heavy metals in soil, plants, and aquatic ecosystems and in humans. Journal of Environmental Pathology, *Toxicology and Oncology.37(3),* pp.183-197. DOI: 10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2018025348.

19- Janisarnavi, T. and Shahrokhi , S., 2022. Assess groundwater quality with help of Hydrochemical parameters (Case study: in Gheydar area, Zanjan Province). *Journal of Environmental Science and Technology, 24(3),*pp. 289-305. (in Persian).

20- Kapsi, M., Tsoutsi, C., Paschalidou, A. and Albanis, T., 2019. Environmental monitoring and risk assessment of pesticide residues in surface waters of the Louros River (NW Greece). *Science of the Total Environment, 650,* pp.2188-2198.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.185.

21- Khalaji, M., E. Ebrahimi, E. Motaghe, S. Asadola and H. Hashemenejad. 2017. Water quality assessment of the Zayandehroud Lake using WQI index. *Iranian Scientific Fisheries Journal, 25(5)*, pp. 51-63. DOI: 10.22092/isfj.2017.110314. ( in Persian).

22- Li, K., Cui, S., Zhang, F., Hough, R., Fu, Q., Zhang, Z., and An, L. 2020. Concentrations, possible sources and health risk of heavy metals in multi-media environment of the Songhua River, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(5),pp. 1766- 1791. https://doi.org/10.3390/ijerph17051766.

23- Luo, M., Zhang, Y., Li, H., Hu, W., Xiao, K., Yu, S., and Wang, X., 2022. Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: the role of groundwater discharge. *Science of the Total Environment, 807(3),* pp. 151-170. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070.

24- Majlesi, M., Alavi, N., Atamaleki, A., Seyyed, M., and Soheili, N., 2019. Investigation of Physicochemical and Microbial Parameters of Doogh River Water and the Effect of Adjacent Felman Wells on Decreasing These Parameters in Kalaleh city During 2012-2016. *Journal of Environmental Health Engineering, 7 (1),* pp. 29-41. DOI: 10.29252/jehe.7.1.29. (in Persian).

25- Najafi, M., ZamaniAhmadmahmoodi, R., Shalui, f. and Ghorbani Dashtaki, p., 2020. Evaluation of heavy metal pollution levels in the Water of the Beheshtabad River. *Journal of Wetland Ecobiology*, *12*(*43*), pp. 17–28. ( In Persian).

26- Nguyen, A.H., N.T.T. Pham, V.M.H. Tat, H.T. Truong and P.L. Vo. 2021. February. Application of Entropy weight in groundwater quality index (EWQI) and GIS for groundwater quality zoning in the Southeastern Coastal region, Vietnam. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 652(1), pp. 1-14. DOI: 10.1088/1755-1315/652/1/012005.

27- Radi, R. and Al-Fanharawi, A., 2022. Water quality assessment of Sawyer river using some environmental indices. *BNIHS, ISSN*, *140*(2), pp. 1343-4292.

28- Rahman, M., Paul, M., Bhoumik, N., Hassan, M., Alam, M., and Aktar, Z. 2020. Heavy metal pollution assessment in the groundwater of the Meghna Ghat industrial area, Bangladesh, by using water pollution indices approach. *Applied Water Science, 10* (8), pp. 1-15.

29- Rizk, R., Juzsakova, T., Rawash, M., Domokos, E., Hedfi. A., and Rédey, Á. 2022. Comprehensive environmental assessment of heavy metal contamination of surface water, sediments and Nile Tilapia in Lake Nasser, Egypt. *Journal of King Saud University-Science, 34(1),* pp. 101748. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101748.

30- Sahoo, M. and Swain, J., 2020. Modified heavy metal Pollution index (m-HPI) for surface water Quality in river basins, India. *Environmental Science and Pollution Research,*(*13)27*, pp. 15350-15364.

31- Sargholzaei S, Frashi A, Safari O. 2017. Evaluation of ecosystem health using bio- integration index (B-IBI) (Case study: Kardeh River). *14th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran.* 10.22059/ije.2020.308851.1376. (In Persian).

32- Seifi, A. and Rahi, H., 2019. Evaluation of Heavy Metal Pollution Indices for Surface Water of the Sarcheshmeh Copper Mine using Multivariate Statistical Methods and GIS. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 1*(50), pp. 161–176. DOI: 10.22059/ijswr.2018.254261.667869. ( in Persian).

33- Singh, J., Yadav, P., Pal, A.K. and Mishra, V., 2020. Water pollutants: Origin and status. *Sensors in water pollutants monitoring: Role of material*, pp.5-20.

34- Thukral, A., and Rodrigo-Comino, J. 2020. Assessment of heavy-metal pollution in three different Indian water bodies by combination of multivariate analysis and water pollution indices. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 26(1),*pp. 1-16. https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1497946.

35- Vinther, F., Pinelo, M., Brøns, M., Jonsson, G., & Meyer, A. S. 2014. Mathematical modelling of dextran filtration through hollow fibre membranes. *Separation and Purification Technology*, 125(2), pp. 21-36. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.034.

36- Vukosav, P., Mlakar, M., Cukrov, N., Kwokal, Z., Pižeta, I., Pavlus, N. and Omanović, D., 2014. Heavy metal contents in water, sediment and fish in a karst aquatic ecosystem of the Plitvice Lakes National Park( Croatia). *Environmental Science and Pollution Research, 21*(5), pp.3826-3839.

37- Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M. and Li, S. 2022. Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science. 34(1). https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101653.*

38- Zhang, J., Guo, L., Deng, Z., Wang, D. and Liu, L., 2021. Assessment of heavy metal pollution and water quality characteristics of the reservoir control reaches in the middle Han River, China. *Science of The Total Environment, 799(6),* pp (149472). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149472.

39- Zhushan, F. and Shuhua Xi. 2020. The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods,* 30.3, pp. 167-176. https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594.

40- Zoqi, M. J., Ayobi, M., & Khataei, B. 2023. Efficiency of various binders in solidification/stabilization of heavy metals and compressive strength in sludge of Ceramic tile factory Niloufar in Birjand. *Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(4),* pp. 741-756.

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 48, No. 1, Spring 2025, p. 127-145**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Investigation of the Effect of Strain Rate and Moisture on the Direct Tensile Strength of Clay Soils Stabilized with Bentonite, Lime, and Cement

M. Oulapour[1]*, M. Ghareineh[2] and S. A. Hosseini Dehdashti[3]

1*- *Corresponding Author*,Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (oulapour_m@scu.ac.ir)
2- Master's Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran.

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 24 July 2024
Revised: 04 December 2024
Accepted: 08 December 2024

*Keywords:*
Tensile strength, Strain rate, cracking, bentonite, lime, cement, optimal moisture content.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Oulapour, M., Gharineh, M., Hosseini Dehdashti, S. A. (2025). 'Investigation of the Effect of Strain Rate and Moisture on the Direct Tensile Strength of Clay Soils Stabilized with Bentonite, Lime, and Cement', Irrigation Sciences and Engineering, 48(1), pp. 127-145. doi: 10.22055/jise.2024.47522.2129.

## Introduction

In civil engineering projects, we often encounter soils that naturally do not possess the required load-bearing capacity during construction and operation (Naeini et al., 2012, Indiramma et al., 2020). The mechanical properties of clay soils can change drastically when exposed to moisture (Hosseinpour Babaei et al., 2023). Suggested solutions for improving the soil at the project site include soil stabilization (Causarano, 1993; Tang et al., 2015, Adhikari, 2017). Without adequate tensile strength, soil is prone to sliding and failure, leading to potential damage and safety hazards (He et al., 2018; Kim & Hwang, 2003). Developing a suitable method for determining soil tensile strength in the laboratory is necessary. In the past, the tensile strength of soils was generally considered negligible. Due to the importance of soil tensile strength, it has been studied using direct tensile tests, Brazilian tensile tests, bending tests, and double punch tests (Wei et al., 2022; Zhou et al., 2016). Xiu et al. (2021) investigated the uniaxial strength of five tailing samples using five different loading rates (0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 mm/min) and found that increasing the loading rate within that range had an increasing effect on uniaxial strength, and the relationship between them conformed to an exponential function. These results were confirmed by previous findings (Cao et al., 2019; Wisetsaen et al., 2015). Chen et al. (2020) evaluated the effect of adding xanthan gum to sandy soil. Their results showed that 2% xanthan gum increased the tensile strength of the sand to 400 kPa by enhancing contact bonding and adhesion. Dagar & Cokca (2021) found that the ratio of direct tensile strength to indirect tensile strength to uniaxial compressive strength was 1.9 and 2, respectively. They also found that the ratio of indirect tensile (splitting) strength to uniaxial compressive strength was 0.4. This study focused on evaluating factors influencing the tensile strength of soil and investigating the effects of soil

stabilization using lime and cement on soil tensile strength. The experiments were conducted using a direct tensile testing apparatus specifically designed for this purpose**.**

**Methodology**

A device similar to that described by Tamarakar et al. (2005) was constructed for the experiments (Figure 1). Four types of materials were used for the experiments: natural soil, bentonite, lime, and cement. The soil used is classified as CL according to the Unified Soil Classification System. The bentonite used in this study has a plastic limit of PL=36 and a liquid limit of LL=155. Also, hydrated lime and Type 2 Portland cement were used for soil stabilization. Specimens prepared include: natural soil, soil-bentonite with 5%, 10%, and 15% bentonite, soil-lime mixture with 2%, 4%, and 6% lime, and soil-cement-lime mixture according to Table (1). To ensure the repeatability of results, two samples were prepared and tested for each experiment.




**Fig. 1- Different parts of the tensile device and their connection to the direct shear apparatus lever: 1) Holding clamp, 2) Fixed mold, 3) Movable mold, 4) Horizontal platform, 5) Placement on the direct shear apparatus platform, 6) Connection of the movable mold to the force application lever, 7) Rammer for compaction of specimens**

**Table 1- Weight percentages of lime and cement in samples made of soil-cement-lime mixture**

| lime(%) | 2 | | | 4 | | | 6 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cement(%) | 7 | 5 | 3 | 7 | 5 | 3 | 7 | 5 | 3 |

The specimens were prepared at 15%, 18%, 20%, and 24% moisture contents and cured for 28 days. Also, the natural soil specimens were prepared at dry densities of 1.58 g/cm³, 1.62 g/cm³, and 1.66 g/cm³. But the treated soil specimens were prepared at a dry density of 1.62 g/cm$^3$ only. First the soil and the additive were mixed and water was added. The mixture was cured for 28 days and then poured into compaction molds in five layers, each compacted with 4 blows of the standard compaction hammer. The tests were conducted at different strain rates of 0.06, 0.12, 0.24, 0.48, 0.72, and 1.44 mm/min.

**Results Analysis**

Figure (2) depicts the failure mode of an specimens. It can be observed that the tensile cracks are nearly straight and perpendicular to the direction of applied force, indicating the movement of the shear molds in the direction of tensile force application. In stiffer specimens, cracks appeared almost instantaneously across the entire surface of the specimen, whereas in softer specimens, cracks initially

appeared at the edges and propagated towards the center, consistent with other studies (Tamrakar et al., 2005, Wei et al., 2022).



**Fig. 2- Failure of a typical samples prepared with 20% moisture content and $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$,**

The experiments conducted on soil with 20% moisture content and a dry density of $\gamma_d$ = 1.62 g/cm³ showed that initially the tensile strength increased as strain rate was increased, reaching its peak at a strain rate of mm/min 0.24. Consistent with Xiu et al. (2021) and Wisetsaen et al. (2015).

Also, it was observed that the tensile strength initially increases with increasing moisture content, peaks at 18% moisture, and then decreases at higher moisture contents. These results are consistent with the theory of unsaturated soil mechanics (Pande & Pietruszczak, 2015).

The effect of addition of bentonite on the tensile strength of soil is nearly linearly, where each 1% increase in bentonite increases the tensile strength by approximately 1.5 kPa. It appears that the mineralogy of clays significantly influences the tensile strength of compacted soils.

Lime stabilized specimens were tested after curing periods of 3, 7, 14, and 28 days. The soil strength increases primarily due to the occurrence of pozzolanic reactions between lime, water, silicates, and aluminates present in the clay minerals. The reactions are time-dependent and gradually increase the soil's strength over time.

It appears that for soils stabilized with 6% lime, the increase in tensile strength due to longer curing time is higher than the same for 2% and 4%. Also, the tensile strength of samples with the same curing time increases by 10% for each 1% increment in lime content.

The tensile strength of the specimens treated by different amounts of lime and cement exhibits a fairly consistent trend with curing time. Also, the tensile strength of samples with the same curing time increases by an average of 5% for each 2% increment in cement content. However, there is a noticeable difference for samples stabilized with 6% lime and 7% cement, which show a steeper increase.

## Conclusions

Based on the experiments and observations conducted, the following conclusions can be drawn:

- The performance of apparatus used for testing was satisfactory and reliable.
- The cracking pattern in softer samples initially appeared at the edges and propagated towards the center, whereas in denser samples, cracking occurred suddenly throughout the specimen. Samples with higher density exhibited larger crack openings.
- Increasing strain rate initially increases tensile strength, but up to a certain point., it decreases. This is due to the inability to form cohesive bonds between particles.
- Moisture content significantly affects the tensile strength of compacted soils. In general, at a constant dry density, increasing moisture content initially increases tensile strength, followed by a decrease. This behavior is attributed to transitioning from low to higher degrees of saturation beyond the threshold moisture content.

- Adding bentonite significantly affects tensile strength due to the increase in clay minerals in the soil.
- Increasing curing time results in higher tensile strength. This is attributed to the progressive pozzolanic reaction over time. However, it is expected that the rate of increase in tensile strength may decrease over time.

**Acknowledgments**

This article is extracted from the dissertation of the Msc course in the Faculty of Civil Engineering and Architecture of Shahid Chamran University of Ahvaz. The financial support of the Vice Chancellor for Research of Shahid Chamran University of Ahvaz in the form of grant GN: SCU.EC96.824 is hereby thanked and appreciated.

**References**

1- Adhikari, S., 2017. *Mechanical properties of soil-rap-geopolymer for the stabilization of road base/subbase*. University of Louisiana at Lafayette.

2- Cao, S., Yilmaz, E., Song, W., Yilmaz, E., Xue, G., 2019 Loading rate effect on uniaxial compressive strength behavior and acoustic emission properties of cemented tailings backfill, Construction and Building Materials, Volume 213, 2019, Pages 313-324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.082.

3- Causarano, H., 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and tillage research*, *28*(1), pp.15-25. https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90052-Q.

4- Chen, C., Peng, Z., Gu, J., Peng, Y., Huang, X. and Wu, L., 2020. Exploring environmentally friendly biopolymer material effect on soil tensile and compressive behavior. *International journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), p.9032.

5- Dagar, V. and Cokca, E., 2021. A Study on Tensile Strength of Compacted Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, *39*(4-5), pp. 751–764. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01519-8

6- He, S., Bai, H. and Xu, Z., 2018. Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess. *Energies*, *11*(8), p.1974. https://doi.org/10.3390/en11081974.

7- Hosseinpour Babaei, I., Rizvani Tochahi, R. and Kavesh Meli, M., 2023. Laboratory investigation of the behavior of clay stabilized with cement and reinforced with geotextile sheets. *Structural and Construction Engineering*, 10(7), pp. 74-91. Doi: 10.22065/jsce.2023.365452.2949 (in Persian).

8- Indiramma, P., Sudharani, C. and Needhidasan, S., 2020. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment–an experimental study. *Materials Today: Proceedings*, *22*, pp.694-700. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.147.

9- Kim, T.H., and Hwang, C., 2003, Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content. *Engineering Geology*, 69(2), pp:233–244. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00284-3.

10- Naeini, S.A., Naderinia, B. and Izadi, E., 2012. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *16*, pp.943-949.

11- Pande, G.N., and Pietruszczak, S., (2015). On unsaturated soil mechanics. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *37*(3): pp. 73-84. https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0035.

12- Tamrakar, S.B., Toyosawa, Y., Mitachi, T. and Itoh, K., 2005. Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus. *Soils and Foundations*, *45*(6), pp.103-110. https://doi.org/10.3208/sandf.45.103

13- Tang, C.S., Pei, X.J., Wang, D.Y., Shi, B. and Li, J., 2015. Tensile strength of compacted clayey soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(4), p.04014122. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001267.

14- Wei, X., Yang, Z., Fleureau, J.M., Hattab, M., Taibi, S. and Xu, L., 2022. Tensile strength identification of remolded clayey soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *81*(10), p.405.https://doi.org/10.1007/s10064-022-02879-6.

15- Wisetsaen, S., Walsri, C., Fuenkajorn, K., 2015, Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp:10-14. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.005.

16- Xiu, Z., Wang, S., Ji, Y., Wang, F., Ren, F. and Nguyen, V.T., 2021. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB). *Construction and Building Materials*, *271*, p.121526. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121526.

17- Zhou, W., Li, S.L., Ma, G., Chang, X.L., Cheng, Y.G. and Ma, X., 2016. Assessment of the crest cracks of the Pubugou rockfill dam based on parameters back analysis. *Geomechanics & engineering*, *11*(4), pp.571-585.https://doi.org/10.12989/.2016.11.4.571



© 2025 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٨، شماره‌ی۱، بهار ١٤٠٤، مقاله پژوهشی، ص. ١٤٥-١٢٧

# بررسی تأثیر سرعتِ کرنش و رطوبت بر مقاومت کششی مستقیم خاک‌های رسی تثبیت شده با بنتونیت، آهک و سیمان

مسعود اولی پور[1*]، مجید قرینه[2] و سید عبدالله حسینی دهدشتی[3]

۱*- نویسنده مسئول، عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز
oulapour_m@scu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

## چکیده

**رفتار کششی مصالح خاکی، نقش مهمی در کاربردهای مهندسی ایفا می‌کند. لایه‌های متراکم خاک، از جمله در سدهای خاکی و پوشش‌های رسی می‌توانند از ترک‌های ناشی از گسیختگی کششی متحمل آسیب شوند. در این مطالعه به بررسی مقاومت کششی خاک‌های رسی و تثبیت‌شده با استفاده از یک دستگاه جدید آزمایش کشش مستقیم خاک می‌پردازیم. دستگاه مذکور، که برای انواع خاک‌های متراکم، سخت، اشباع و نرم تا سفتی متوسط قابل استفاده است، توسعه یافته و روش انجام آزمایش‌ها با آن تشریح شده است. نمونه‌های خاک در قالب‌های ویژه آماده شده و به دستگاه منتقل شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده تکرارپذیری و دقت بالای دستگاه بود. تأثیر نرخ کرنش (از۰/۰٦ تا ۱/٤٤ میلی‌متر در دقیقه)، میزان رطوبت (۱۵درصد تا ٢٤ درصد) و دانسیته خشک بر مقاومت کششی خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، اثر افزودن بنتونیت (پنج درصد ، ۱۰ درصد و ۱۵ درصد)، آهک (دو درصد ، چهار درصد و شش درصد) و ترکیب سیمان و آهک (با درصدهای وزنی مختلف) بر مقاومت کششی خاک مطالعه شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد بنتونیت، آهک و سیمان، مقاومت کششی خاک به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌ویژه، ترکیب سیمان و آهک با نسبت‌های مختلف باعث بهبود ۳۷ درصد در مقاومت کششی خاک شد.**

**کلید واژه‌ها:** مقاومت کششی خاک، سرعت کرنش، ترک‌خوردگی، بنتونیت، آهک، سیمان، رطوبت بهینه.

## مقدمه

در خِلال اجرای پروژه‌های عمرانی گاهی با خاک‌هایی مواجه می‌شویم که ظرفیت تحمل بار وارده از طرف سازه را به‌صورت طبیعی در حین ساخت و بهره‌برداری ندارند (Naeini et al., 2012). در بسیاری از این پروژه‌ها خاک محل پروژه جزء خاک‌های مسئله‌دار است. مهندسین تلاش می‌کنند تا حد امکان از خاک مسئله‌دار اجتناب کرده و در صورت امکان محل دیگری را برای پروژه خود انتخاب نمایند و یا خاک نامناسب را با خاک مناسب‌تر جایگزین نمایند. در دهه‌های اخیر با توسعه صنعت و شهرها، با توجه به محدودیت در مکان و زمان و هزینه، نیاز به احداث زیرساخت‌ها روی بسترهای نامرغوب و مسئله‌دار شدیداً احساس می‌شود. خاک رس با خصوصیات خمیری بالا یکی از انواع خاک‌ها ی مسئله‌دار است که نسبت به رطوبت حساسیت بالایی داشته و در صورت مرطوب شدن به شدت متورم می‌شود و با از دست دادن رطوبت دچار انقباض و کاهش حجم می‌گردد. این رفتار خاک را برای استفاده‌های مهندسی نامناسب می‌سازد .(Indiramma et al., 2020) یکی از دلایل اصلی وقوع گسیختگی در این خاک‌ها، مقاومت فشاری و کششی پایین آن‌ها است. همچنین تغییر خصوصیات مکانیکی خاک‌های مسئله‌دار مانند خاک‌های رسی در هنگام قرارگیری در معرض رطوبت هم می‌تواند از طریق انبساط جانبی و کاهش شدید مقاومت، باعث بروز چنین مشکلاتی شود (Hosseinpour Babaei et al., 2023). از راهکارهای پیشنهاد شده برای بهبود وضعیت خاک محل پروژه می‌توان به جایگزینی خاک نامرغوب با خاک مناسب، طراحی شالوده‌های عمیق و یا استفاده از شیوه‌های بهسازی خاک اشاره نمود.(Mirzaei et al., 2021) تثبیت یکی از این شیوه‌های بهسازی خاک است که به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. تثبیت کننده‌های معمول خاک شامل سیمان و آهک می‌باشند که با اضافه شدن به خاک، خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک را برای دست‌یابی به مقاومت، سختی و توانایی مقابله با انقباض خاک، افزایش می‌دهند (Adhikari, 2017). خاک به‌طور معمول در معرض انواع تنش‌های برشی، فشاری و کششی قرار می‌گیرد. تثبیت و بهسازی خاک به‌منظور بهبود خواص مکانیکی آن، همچون افزایش مقاومت کششی، یکی از حیطه‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌آید. .(Causarano, 1993; Tang et al., 2015)

پایداری و مقاومت خاک یکی از ملاحظات مهم در پروژه‌های عمرانی و گسترش زیرساخت‌ها به شمار می‌آیند. مقاومت کششی به‌عنوان پارامتر مهم در کنترل گسترش ترک و تغییر شکل در اثر تنش تحمیل شده، تأثیر ویژه‌ای در پایداری و ظرفیت باربری خاک دارد. بدون مقاومت کششی مناسب، خاک مستعد لغزش و گسیختگی بوده و خسارات و خطراتی جانبی را به‌همراه خواهد داشت (He et al., 2018, Kim and Hwang 2003).

به‌منظور داشتن درک مناسبی از ایجاد و توسعه ترک‌های کششی که منجر به گسیختگی شیب‌ها، خاک‌ریزها، سدهای خاکی، پوشش‌های رسی و ... می شود، لازم است مقاومت کششی که یک خاک به‌خصوص از خود نشان می‌دهد را بدانیم. به همین منظور توسعه روشی آسان و مناسب به‌منظور تعیین مقاومت کششی خاک در آزمایشگاه ضروری است. در گذشته به طور کلی از مقاومت کششی خاک‌ها صرف‌نظر می‌شد، زیرا مقاومت کششی خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های نرم و اشباع، صفر فرض می‌شد و یا در مقایسه با مقاومت فشاری بسیار کم در نظر گرفته می‌شد. به‌علاوه اینکه به سختی می‌شد مقاومت کششی را به‌طور مستقیم در آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود. با توجه به اهمیت مقاومت کششی خاک، این مسئله همیشه به کمک آزمایش‌هایی مانند کشش مستقیم، کشش برزیلی، تیر خمشی و دابل پانچ (Double Punch test) مورد بررسی قرار می‌گرفته است.(Wei et al. 2022; Zhou et al. 2016) در ادامه برخی از مطالعه‌های انجام شده قبلی در زمینه مقاومت کششی خاک ارائه می‌گردد.

برای اولین بار Tschebatorioff (1953) آزمایش‌های اولیه برای بررسی مقاومت کششی چهار رس مختلف را با روشی معین انجام داد تا تاثیر نوع کانی‌های رس را روی خصوصیات تنش– کرنش مطالعه کند. خاک‌های رسی در قالب‌هایی به طول ۱۳۲ سانتی‌متر و با یک مقطع مستطیلی متراکم شده بودند. در این مطالعه، اثر کانی رس، درصد رطوبت تراکم، مدت زمان اختلاط، مدت زمان انجام آزمایش و نرخ کرنش بر مقاومت کششی و کرنش خاک‌های رسی مورد بررسی قرار گرفت. سه نوع از چهار نوع خاکی که در مطالعه استفاده شدند کانی‌های رسی خالص مونت‌موریلونیت، ایلیت و کائولینیت بودند. نتایج آزمایش نشان داد که مقادیر مقاومت کششی و کرنش رس‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای به ماهیت کانی‌های خاک رس بستگی دارد.

Hasegawa و Ikeuti (1966) دستگاهی ساده‌تر از Tschebatorioff (1953) برای آزمایش کشش مستقیم رس متراکم معرفی کردند، اما با مشکل تنش‌های برشی روی سطح مرزی پایین نمونه مواجه بودند. Ajaz و Parry (1974) دستگاه جدیدی برای مطالعه رفتار تنش–کرنش رس‌های متراکم توسعه دادند که در آزمایش‌های کشش مستقیم و خمش استفاده شد. Peters و Leavell (1988) دستگاه پیشرفته‌ای را معرفی کردند که مشکلات دستگاه‌های قبلی، مانند تغییرات ناهمگن بار و اندازه‌گیری کرنش، را حل نموده و رابطه بین مقاومت کششی و پتانسیل مکش خاک را بررسی می‌کرد.

Tamrakar et al و Nahlawi et al. (2004) (2005) دستگاه سنجش مقاومت کششی معرفی کرده‌اند که مستقیماً مقاومت کششی را اندازه می‌گیرد. اما دستگاهی که توسط Nahlawi et al (2004) توسعه یافته اساساً می‌تواند برای خاک‌های رسی متراکم و خاک‌های سخت مورد استفاده قرار گیرد در حالی‌که به نظر می‌رسد دستگاه توسعه یافته توسط Tamrakar et al (2005) می‌تواند هم برای خاک‌های متراکم غیر اشباع و هم برای خاک‌های کاملاً اشباع مورد استفاده قرار گیرد.

Abbasi et al. (2017) در تحقیقی زئولیت را به‌عنوان یکی از مواد افزودنی به سیمان و آثار آن در مقاومت کششی ماسه مورد ارزیابی قرار دادند. در آن تحقیق، ابتدا اختلاط براساس وزن خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد روی اختلاط‌های مختلف انجام شده و سپس نمونه‌ها ساخته و در شرایط مطلوب رطوبتی و دمایی به مدت ۲۸ روز نگهداری می‌شدند و نهایتاً آزمایش مقاومت کششی برزیلی انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داده که با جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت به جای سیمان، مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان ۴۰ درصد افزایش یافته است.

Yin و Vanapalli (2018) یک مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی تغییر مقاومت کششی خاک‌های غیرچسبنده غیر اشباع بر اساس درجه اشباع، و با استفاده از منحنی مشخصه آب و خاک (SWCC) پیشنهاد دادند. مدل پیشنهادی قادر به پیش‌بینی مقاومت کششی ناشی از مکش زمینه و کشش سطحی بوده که به‌ترتیب مربوط به منافذ اشباع شده و رابط هوا–آب مرتبط با پل‌های آبی در نقاط تماس ذرات در منافذ غیراشباع است. برای به کارگیری این مدل، اطلاعاتی نظیر ۱- مکش زمینه (matric-suction) ($u_a - u_w$)، درجه اشباع موییننگی (Sc) ، درجه اشباع باقی‌مانده (Sr) حاصل از منحنی SWCC، ۲- اندازه متوسط ذرات ($d_{50}$) و ضریب یکنواختی ($C_u$) از منحنی دانه‌بندی، ۳-نسبت پوکی و ۴- زاویه اصطکاک داخلی ($\varphi$) در سطح تنش نرمال پایین مورد نیاز است. مدل پیشنهادی با مقایسه نتایج پیش‌بینی با مقاومت کششی اندازه‌گیری شده از ۱۰ خاک غیرچسبنده و غیر اشباع مختلف تأیید گردید. نتایج مشابهی توسط Bulolo et al (2021) گزارش شده است.

Xiu et al. (2021) مقاومت تک‌محوری پنج نمونه‌های باطله را با استفاده از پنج سرعت بارگذاری مختلف (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر بر دقیقه) بررسی کردند و یافته‌ها نشان داد که افزایش سرعت بارگذاری در آن حدود اثر افزایشی بر مقاومت تک‌محوری داشته و رابطه بین آن‌ها با یک تابع نمایی مطابقت دارد. هم‌چنین رهنمودهایی در انتخاب سرعت بارگذاری مناسب برای ارزیابی مقاومت تک‌محوری ارائه دادند. این نتایج با نتایج

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

قبلی تأیید شد. (Wisetsaen et al. ; Cao et al. 2019 2015).

Chen et al. (2020) طی تحقیقی تأثیر افزودن صمغ ژانتان (Xanthan gum) به خاک ماسه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو درصد صمغ با افزایش پیوند تماسی و چسبندگی باعث افزایش مقاومت کششی ماسه تا ۴۰۰ کیلوپاسکال می‌شود.

Ghalandarzadeh et al. (2021) در تحقیقی یک دستگاه استوانه توخالی با قابلیت اندازه‌گیری خصوصیات کششی خاک طراحی، ساخت و راه‌اندازی کردند. دستگاه قادر بود تنش کششی را به‌طور یکنواخت به کل توده خاک اعمال نماید و به‌طوری که تمرکز تنش در هیچ نقطه‌ای از نمونه رخ ندهد. نتایج آزمایش تکرارپذیری نشان داد که عملکرد دستگاه دقیق و مطلوب است. همچنین اثر شاخص خمیری خاک رسی (کائولینیت) بر رفتار کششی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شاخص خمیری خاک‌ها ۱۰ و ۲۴ درصد انتخاب گردید. نتایج نشان داد که برای خاک‌های رسی با یک منشاء مشخص، با افزایش شاخص خمیری، مقاومت کششی افزایش و کرنش گسیختگی کششی کاهش پیدا می‌کند. این نتایج با اندازه‌گیری‌های Trabelsi et al (2012) تطابق خوبی داشت.

Mirzaei et al. (2021) در تحقیقی به ارزیابی مشخصات مقاومتی خاک رس تثبیت شده با ضایعات صنعتی از جمله سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت به‌ترتیب با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خشک خاک پرداختند. نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه متراکم شدند. نتایج نشان داد که سرباره به‌عنوان تثبیت کننده نسبت به خاکستربادی و دیاتومیت عملکرد بسیار مناسبتری داشته است.

Rezaei Moghadam et al. (2021) در یک مطالعه سعی بر آن داشتند تا با بهبود مقاومت فشاری و کششی ماسه بادی موجود در سواحل دریاها و بیابان‌ها، امکان استفاده از این مصالح در لایه‌های خاک بستر، زیراساس و اساس راه‌ها به‌صورت تثبیت شده با سیمان مورد بررسی قرار دهند. آن‌ها ۲۰۰ نمونه با سه درصد، شش درصد و ۱۲ درصد سیمان به‌همراه ۰/۳ درصد، ۰/۶ درصد و ۱/۲ درصد نیکوفلاک از مصالح ماسه بادی نمونه‌برداری شده، ساختند. مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم هفت روزه و ۲۸ روزه نمونه‌ها محاسبه شد و میزان افت مقاومت آن‌ها در ۴۵ سیکل ذوب و یخ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد تثبیت مصالح ماسه بادی با سیمان به همراه افزودنی نیکوفلاک، به دلیل افزایش مقاومت فشاری و کششی این مصالح، امکان استفاده از آن در لایه‌های روسازی راه‌ها فراهم می‌آورد.

Dagar و Cokca (2021) با انجام آزمایش‌های کشش مستقیم و کشش غیرمستقیم (شکافتن) و نیز فشار تک‌محوری خاک رس متراکم تثبیت شده با مواد مختلف و مقایسه آن‌ها دریافتند که نسبت مقاومت کششی مستقیم و مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری به‌ترتیب برابر ۱/۹ و دو است. همچنین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (شکافتن) به مقاومت فشاری تک‌محوری برابر ۴/۰ می‌باشد. آنها سه معادله برای تخمین مقاومت کششی خاک‌های دانه‌ای ریزدانه بر اساس حدود آتربرگ و مشخصات تراکمی آن‌ها پیشنهاد کردند.

Ji et al. (2020) مجموعه‌ای از آزمایش‌های کشش تک محوره و آزمایش‌های برش سه محوره تحکیم یافته زهکشی شده برای بررسی روابط بین مقاومت کششی و شاخص‌های مقاومت برشی خاک‌های قلوه سنگی با درصد قلوه‌سنگ از صفر درصد تا ۵۰ درصد انجام داده و نتیجه گرفتند که در نمونه‌های خاک در حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه، مقاومت کششی با افزایش درصد قلوه‌سنگ به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

Zhang et al. (2022) آزمایش‌های مشابهی روی مقاومت کششی درشت دانه تثبیت شده با الیاف پلی‌پروپیلن انجام دادند. بررسی نتایج ظرفیت جذب انرژی نشان داد که هرچه میزان شن در خاک کمتر باشد، میزان بهبود در ظرفیت جذب انرژی بیشتر است .در عمل توصیه می‌شود برای طراحی ضد ترک دیواره هسته سد سنگ‌ریزه‌ای بلند با هسته ریزدانه از خاک قلوه سنگی با محتوای شن کم و الیاف بالا استفاده شود. همچنین یک مدل برازشی با در نظر گرفتن میزان شن و محتوای الیاف برای پیش‌بینی سریع مقاومت کششی خاک پیشنهاد شد.

Gao et al. (2023) تأثیر نسبت خلاء اولیه روی مقاومت کششی یک خاک رسی لاغر و غیر اشباع را در طیف وسیعی از نسبت خلاء اولیه و میزان رطوبت را با استفاده از آزمایش کشش برزیلی بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که برای نمونه‌هایی با نسبت حفره‌ای مختلف، می‌توان درجه بحرانی اشباع را مشاهده کرد که در آن مقاومت کششی خاک به حداکثر می‌رسد. علاوه بر این، مدل پیش‌بینی کننده مقاومت کششی با در نظر گرفتن تأثیر نسبت خلاء اولیه، برای هر دو نوع خاک درشت دانه و ریزدانه غیر اشباع و بر اساس اندرکنش مکانیسم‌های جذب رطوبت و خاصیت مویینگی خاک، پیشنهاد داده‌اند.

Mohseninia و Salehzadeh (2023) در یک مطالعه آزمایشگاهی، قابلیت کششی ماسه بهسازی شده با صمغ فارسی (Persian gum) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اضافه کردن محلول یکنواخت صمغ–آب (شامل دو درصد وزنی صمغ و ۱۶ درصد وزنی آب نسبت به وزن خاک خشک) به خاک خشک بهترین شیوه اختلاط و تراکم اولیه نسبی۵۰ درصد برای خاک، تراکم بهینه برای کسب بیشترین مقاومت کششی بوده است. همچنین ارتباط مستقیمی بین افزایش دما و کاهش رطوبت با افزایش مقاومت کششی برقرار است.

Hosseinpour Babaei et al. (2023) در پژوهشی تأثیر ژئوتکستایل بر رفتار زهکشی‌نشده نمونه‌های رسی تثبیت‌شده با سیمان را بررسی می‌کردند. نمونه‌ها با سه، پنج و هفت درصد

سیمان و سه درصد رطوبت مختلف آماده شدند و با ژئوتکستایل‌های بافته‌نشده در حالت‌های یک‌لایه، دولایه و سه‌لایه مسلح شدند. نتایج نشان داد تسلیح با سه‌لایه ژئوتکستایل مقاومت را به‌طور متوسط ۳۷ درصد افزایش داد. همچنین، ژئوتکستایل باعث کاهش سختی و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها شد و از انتشار ترک‌ها جلوگیری کرد.

Wang et al. (2024) بر اساس یافته‌های تجربی نشان دادند که مقاومت کششی تک محوره و مقاومت فشاری تک محوره با افزایش درجه اشباع روند مشابهی را دنبال می‌کنند و وابستگی قابل توجهی به تغییرات مکش زمینه دارند. همچنین با استفاده از نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری و بعد فراکتالی سطح منافذ مدل‌های پیش‌بینی مقاومت کششی به توسعه دادند. این مدل‌ها دارای مفاهیم فیزیکی خاصی هستند که محدودیت‌های مدل‌های برازش یافته را جبران می‌کنند.

در این تحقیق، دستگاه جدید آزمایش کشش مستقیم که می‌تواند هم برای خاک‌های متراکم و سخت و هم خاک‌های اشباع و نرم تا متوسط مورد استفاده قرار گیرد، و همچنین روش انجام آزمایش به‌وسیله آن شرح داده شده است. نمونه خاک‌ها درون قالب‌هایی که به این منظور ساخته شده بودند، آماده و سپس به درون دستگاه آزمایش کشش منتقل می‌شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این تست‌ها تکرار پذیر و قابل اطمینان هستند. اثر نرخ کرنش، میزان رطوبت، دانسیته خشک و اثر اضافه کردن بنتونیت، آهک، سیمان و همچنین ترکیب سیمان و آهک بر مقاومت کششی خاک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### دستگاه آزمایش

مشابه دستگاه Tamrakar et al. (2005) دستگاهی جهت انجام آزمایش‌ها ساخته شد (شکل ۱). این دستگاه از دو قالب مجزا که یکی ثابت و دیگری متحرک است تشکیل شده است. این دو قالب روی یک سکوی افقی قرار می‌گیرند. قالب ثابت توسط پیچ و مهره به سکوی افقی زیر آن بسته می‌شود. به‌منظور کاهش اصطکاک بین قالب متحرک و سکو، از چند بلبرینگ که بین قالب و سکو قرار می‌گیرند، استفاده شد. سطح داخلی این قالب‌ها در همه جا به جز در قسمتی که به هم متصل می‌شوند دایروی است. برای جلوگیری از تکان خوردن قالب‌های کشش به هنگام جای‌گذاری نمونه، دو قالب توسط یک گیره نگه‌دارنده به هم متصل می‌شوند تا نمونه درون دستگاه قرار گیرد. پس از قرار گیری نمونه و پیش از اعمال نیرو این گیره باز میشود. قالب متحرک در جهت افقی کشیده می‌شود تا وقتی که ترک‌های کششی در قسمت وسط نمونه، جایی که دو قالب به هم متصل شده‌اند، ظاهر شوند. اعمال نیرو با استفاده از اهرم دستگاه برش مستقیم و اندازه‌گیری نیرو توسط گیج متصل به دستگاه برش مستقیم صورت می‌گرفت. مقاومت کششی از تقسیم حداکثر بار نشان داده شده توسط گیج نیرو بر مساحت ترک کششی عمود بر جهت کشش به‌دست می‌آید. مساحت سطح قالب‌ها ۳۹/۲۴ سانتی‌متر مربع و حجم آن ۱۹۶/۲ سانتی‌متر مکعب می‌باشد. حداقل عرض قالب‌ها سه و ارتفاع آن پنج سانتی‌متر است.

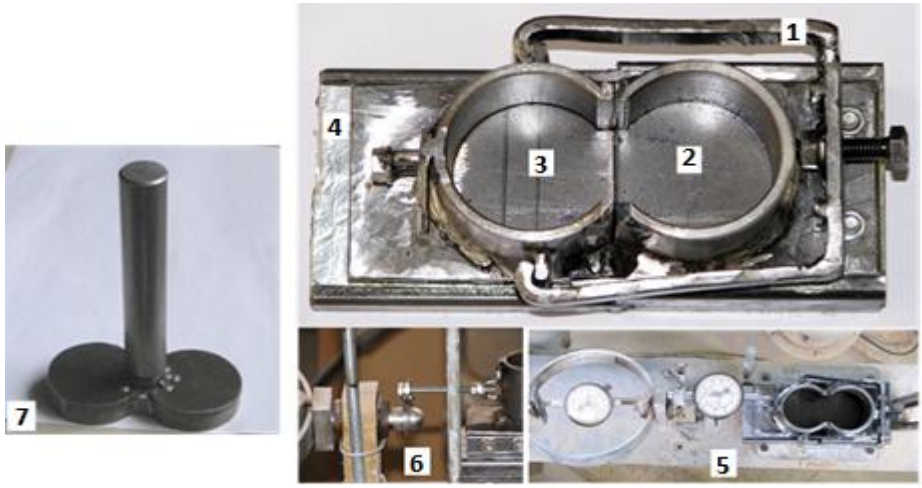



**Fig. 1- Different parts of the tensile device and their connection to the direct shear apparatus lever: 1) Holding clamp, 2) Fixed mold, 3) Movable mold, 4) Horizontal platform, 5) Placement on the direct shear apparatus platform, 6) Connection of the movable mold to the force application lever, 7) Rammer made for compaction of specimens.**

**شکل ۱- بخش‌های مختلف دستگاه کشش و نحوه اتصال به اهرم دستگاه برش مستقیم: ۱) گیره نگه‌دارنده، ۲) قالب ثابت، ۳) قالب متحرک، ٤) سکوی افقی، ٥) قرار گیری روی سکوی دستگاه برش مستقیم، ٦) اتصال قالب متحرک به اهرم اعمال نیرو، ۷) کوبه ساخته شده کمکی برای تراکم**

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

### مصالح مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌ها از چهار نوع مصالح استفاده شد: خاک طبیعی، بنتونیت، آهک و سیمان. خاک استفاده شده بر اساس سیستم طبقه بندی متحد در رسته CL قرار می گیرد. حد خمیری و روانی این خاک به ترتیب برابر است با PL=۱۳ و LL= ۴۳. منحنی دانه‌بندی این خاک را می توان در شکل (۲) مشاهده نمود.

بنتونیت مصرفی در این تحقیق نیز دارای حد خمیری PL=۳۶ و حد روانی LL=۱۵۵ بود. با توجه به حضور گسترده خاک‌های ریزدانه رسی در سطح کشورمان، مشکلات زیادی در پایداری برخی پروژه‌ها ناشی از وجود این خاک‌ها ایجاد شده است. یکی از راه‌حل‌های این مشکلات، تثبیت خاک با استفاده از مصالح تثبیت کننده، از جمله آهک، سیمان و یا ترکیب هردو می‌باشد. در این پژوهش جهت تثبیت خاک، از آهک هیدراته و سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شد.

### مشخصات آزمایش‌ها و نمونه‌ها

در بسیاری موارد، عوامل مؤثر بر مصالح سازه‌های خاکی عبارتند از توزیع اندازه دانه‌ها، حدود اتربرگ، ضخامت هر لایه خاک برای تراکم، میزان رطوبت و میزان تراکم. به‌منظور در نظر گرفتن این عوامل، نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش‌های کشش مستقیم تحت شرایط مختلف که در ادامه آمده است، آماده شدند.

### نوع خاک

نمونه‌ها از ترکیب چهار نوع مصالح، به‌صورت خاک طبیعی، مخلوط خاک و بنتونیت، مخلوط خاک و آهک و مخلوط خاک – سیمان – آهک ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. مخلوط خاک و بنتونیت از سه ترکیب خاک به علاوه درصدهای وزنی پنج درصد، ۱۰درصد و ۱۵درصد بنتونیت، مخلوط خاک و آهک نیز از سه ترکیب خاک به‌علاوه درصدهای وزنی دو درصد، چهار درصد و شش درصد آهک و مخلوط خاک–سیمان–آهک از نه ترکیب خاک به‌علاوه درصدهای وزنی آهک و سیمان که در جدول (۱) آورده شده است، تهیه شدند. در شکل (۳) نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

### میزان رطوبت تراکم

یکی از عوامل مؤثر بر مقاومت، نفوذپذیری و شکل‌پذیری خاک‌های متراکم، میزان رطوبت است. برای بررسی اثر میزان رطوبت بر مقاومت کششی خاک، تنها نمونه‌های ساخته شده از خاک طبیعی با چهار میزان رطوبت مختلف شامل ۱۵درصد، ۱۸درصد، ۲۰درصد و ۲۴درصد ساخته شده‌اند. لیکن پس از حصول بهترین میزان رطوبت، مابقی نمونه‌ها تنها با رطوبت ۲۴درصد تهیه شدند.

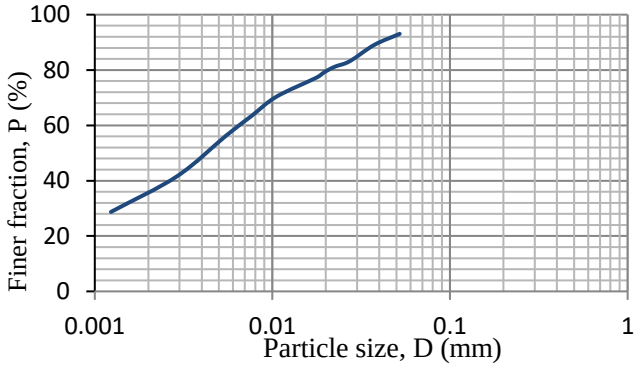



**Fig. 2- Gradation curve of used soil.**

**شکل ۲- منحنی دانه بندی خاک استفاده شده**

**جدول ۱- درصدهای وزنی آهک و سیمان در نمونه‌های ساخته شده از مخلوط خاک–سیمان–آهک**

**Table 1- Weight percentages of lime and cement in samples made of soil-cement-lime mixture**

| (%) lime | 2 | | | 4 | | | 6 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (%) Cement | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |



**Fig. 3- Prepared specimens**

**شکل ۳- نمونه‌های ساخته شده**

**نرخ (سرعت) اعمال کرنش**

همان‌طور که قبلاً گفته شد یکی از عوامل مؤثر بر رفتار مصالح اعم از مدول الاستیسیته و برشی و بخصوص مقاومت سرعت بارگذاری است. در این خصوص تست‌ها با سرعت‌های مختلف اعمال کرنش یا تنش تکرار شده و نتایج مقایسه می‌گردند. برای تعیین تأثیر احتمالی سرعت کرنش روی نتایج مقاومتی در این پژوهش از سرعت‌های mm/min ۰/۰۶، ۰/۱۲، ۰/۲۴، ۰/۴۸، ۰/۷۲ و ۱/۴۴ استفاده شده است.

**میزان تراکم**

برای بررسی اثر تراکم، نمونه‌های خاک طبیعی با سه دانسیته خشک ۱/۵۸، ۱/۶۲ و ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب آماده شدند. دانسیته خشک بقیه نمونه‌ها ۱/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد.

**آماده سازی نمونه‌ها**

به‌منظور ساخت نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط خاک و بنتونیت، با توجه به دانسیته خشک و درصد رطوبت مورد نظر، مقدار مشخصی خاک و آب با هم مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت در یک کیسه پلاستیکی بدون منفذ نگهداری می‌شدند تا آب بطور یکنواخت درون مصالح توزیع شود. سپس مخلوط در پنج لایه به درون قالب‌های مخصوص ساخت نمونه ریخته می‌شد. پس از ریختن هر لایه در قالب مخصوص، یک کوبه شکل (۱) به شکل سطح مقطع نمونه، روی لایه خاک قرار داده شده و با استفاده از چکش آزمایش تراکم استاندارد، چهار ضربه به آن وارد میشد. نمونه‌ها در رطوبت‌های ۱۵، ۱۸، ۲۰ و ۲۴ درصد و دانسیته خشک ۱/۵۸، ۱/۶۲ و ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شدند.

به‌منظور ساخت نمونه‌های تثبیت شده با آهک، ابتدا با توجه به دانسیته خشک انتخابی ($\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$) و درصد وزنی آهک، خاک و آهک به میزان مناسب با هم مخلوط می‌شدند و پس از یکدست شدن، برای رسیدن به رطوبت ۲۴ درصد، آب به آن‌ها اضافه می‌شد. برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان نیز ابتدا خاک و آهک با هم مخلوط و سپس سیمان و بعد آب به آن‌ها اضافه می‌شد. پس از اختلاط، به همان ترتیبی که پیش‌تر ذکر شد نمونه‌ها ساخته و درون کیسه پلاستیکی بدون منفذ قرار می‌گرفتند. نمونه‌های تثبیت شده، پس از ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز (در برخی موارد ۳۱ یا ۳۲ روز) مورد آزمایش قرار می‌گرفتند.

برای انجام آزمایش، ابتدا قالب‌های کشش و بقیه قطعات به‌هم متصل شدند. سپس قالب متحرک به اهرم اعمال نیرو دستگاه برش مستقیم متصل گشت. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی درون قالب‌های کشش قرار می‌گرفتند. سپس سرعت اعمال نیروی کششی به نمونه تنظیم و گیره نگه‌دارنده دو قالب از هم باز می‌شد. با روشن کردن دستگاه برش مستقیم، نمونه تحت کشش قرار می‌گرفت. اعمال نیرو تا رسیدن به گسیختگی کامل نمونه ادامه پیدا می‌کرد. در شکل (۴) نمونه آماده شده نهایی قبل از انجام تست کشش نشان داده شده است.

## بررسی نتایج

شکل (۵)، دو نمونه را پس از گسیختگی کششی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ترک‌های کششی تقریباً مستقیم و عمود بر جهت اعمال نیرو هستند که نشان می‌دهد حرکت قالب‌های کشش در جهت اعمال نیروی کششی است.

به نظر می‌رسد حداکثر مقاومت کششی مشاهده شده، حداکثر تنش کششی است که برای شکستن بیشتر پیوندهای ذرات خاک لازم است. هنگامی که بیشتر پیوندهای ذرات خاک شکسته شد، تنش کششی شروع به کاهش میکند تا تقریباً تمام پیوندها شکسته شوند. Ohkubo (2002) و Ono (2003) نیز به‌طور مشابه کاهش تنش کششی بعد از حداکثر مقدارش را متذکر شده‌اند. پس از شروع به کاهش تنش کششی و بیشتر شکسته شدن پیوندهای بین ذرات خاک، می‌توان توسعه ترک کششی را در سطح بالای نمونه مشاهده کرد. در نمونه‌های سفت و سخت‌تر، ترک تقریباً در یک لحظه در سرتاسر سطح نمونه ایجاد می‌شد و در نمونه‌های نرم‌تر، ترک ابتدا در کناره‌ها ظاهر و به سمت وسط گسترش می‌یابد که مشابه دیگر پژوهش‌ها است (Tamrakar et al., 2005). همچنین مشاهده شد که بازشدگی ترک در نمونه‌های سخت‌تر بزرگتر است. به‌منظور اطمینان از تکرار پذیر بودن نتایج، برای هر تست، دو نمونه ساخته و آزمایش شد. اگرچه تفاوت اندکی در مقاومت‌های کششی به‌دست آمده از تست‌های تکرار شده وجود دارد، با این حال می‌توان گفت که نتایج حاصل شده تکرار پذیر هستند.

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

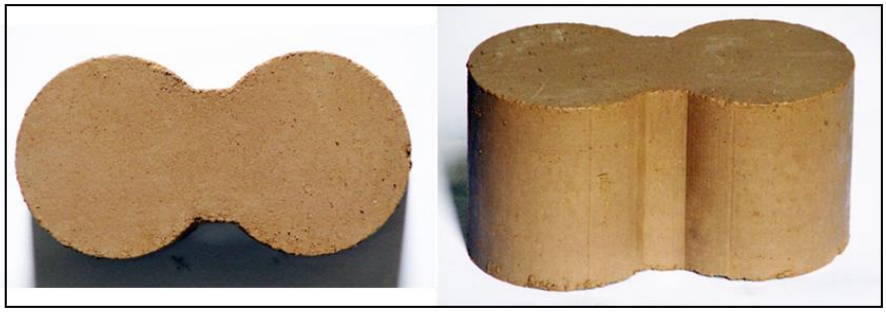
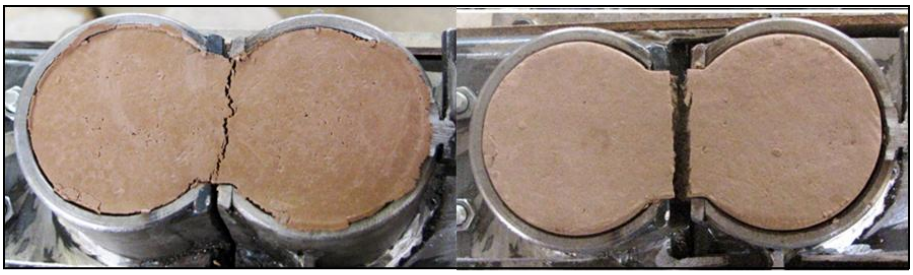


**Fig. 4- Sample made for testing**
**شکل ٤- نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش**



a b

**Fig. 5- Breakage of some samples; (a) sample made from soil with 20% humidity and $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$, (b) 7-day sample stabilized with 2% lime and 3% cement**
**شکل ٥- گسیختگی برخی نمونه‌ها؛ (a) نمونه ساخته شده از خاک با رطوبت ۲۰ درصد و $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$، (b) نمونه هفت روزه تثبیت شده با دو درصد آهک و سه درصد سیمان**

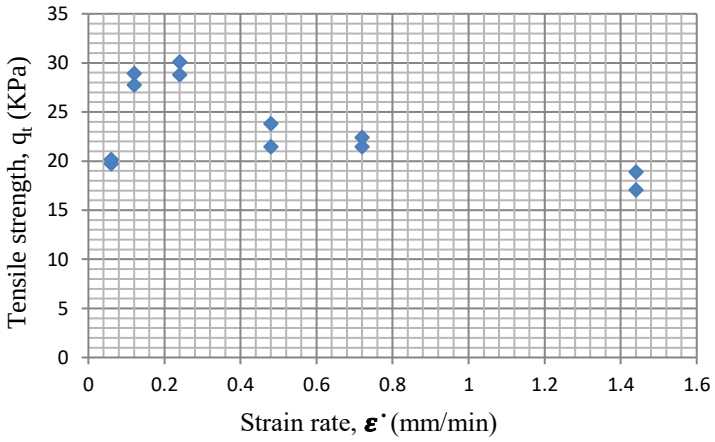



**Fig. 6- Changes in soil tensile strength with strain rate**
**شکل ٦- تغییرات مقاومت کششی خاک با نرخ کرنش**

**اثر نرخ کرنش**

شکل (۶) نتیجه آزمایش‌های بررسی اثر نرخ کرنش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های بررسی اثر نرخ کرنش روی خاک با درصد رطوبت ۲۰ درصد و $\gamma_d$=1.62 gr/cm$^3$ انجام گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ کرنش مقاومت کششی افزایش می‌یابد و در نرخ کرنش ۰/۲۴ mm/min، مقاومت کششی به اوج خود می‌رسد. پس از آن کاهش مقاومت مشاهده می‌شود که این کاهش تا سرعت ۰/۴۸ mm/min، زیاد و پس از آن کاهش

مقاومت کمتر است. نتایج این تست‌ها در تحقیقات قبلی نیز مشاهده شده است. (Xiu et al. 2021 و Wisetsaen et al. 2015). همچنین با توجه Alzubaidi و Lafta (2013) برای خاک طبیعی، نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت برشی زهکشی نشده و نیز چسبندگی با افزایش سرعت کرنش به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که برای مخلوط خاک-آهک در دوره‌های عمل آوری مختلف، این مقادیر ابتداء به حداکثر رسیده و سپس با افزایش نرخ کرنش با وجود افزایش میزان آهک کاهش می‌یابد. این کاهش که در سرعت کرنش ۰/۲ mm/min اتفاق افتاده است. همچنین Zarei, et al (2023) در آزمایش‌های خود نشان دادند که در نرخ کرنش ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به نمونه‌هایی که در نرخ‌های کرنش ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شده بودند، مقاومت بالاتری از خود نشان دادند. Hu et al. (2023) با بررسی خاک‌های رسی سیلتی متراکم غیر اشباع، با نرخ کرنش و فشارهای محصورکننده مختلف نشان دادند که نرخ کرنش بحرانی برابر ۰/۱ mm/min در فشارهای محصورکننده پایین وجود دارد که در سرعت کرنش کمتر از آن مقاومت با افزایش سرعت کرنش کاهش می‌یابد و بالاتر از آن با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. در این شکل تکرار پذیری آزمایش‌ها نیز نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که در این نمودار تاثیر سرعت کرنش بررسی اجمالی شده و تشابه ظاهری این نمودار با نمودارهای تنش-کرنش دلیلی بر بروز کرنشهای بزرگ و مقاومت باقی‌مانده (Residual strength) فرق می‌کند. زیرا نقاط مقاومت حداکثر (Peak strength) در هر سرعت کرنش در این نمودار ارتباطی با میزان کرنش متناظر با آن مقاومت ندارد.

### اثر دانسیته خشک و میزان رطوبت

رابطه بین مقاومت کششی، دانسیته خشک و درصد رطوبت در شکل (۷) نشان داده شده است. سه منحنی مجزا برای سه دانسیته خشک نشان داده شده است. میزان رطوبت تراکم، عامل مهمی در تعیین رفتار مهندسی خاک‌های متراکم است، به این دلیل که درصد رطوبت تراکم، تجدید آرایش ذرات خاک تحت انرژی تراکم را کنترل می‌کند و موجب افزایش مقاومت و نفوذپذیری خاک‌های متراکم می‌شود. در این نمونه ها میزان درصد اشباع بین ۹۰ الی ۹۶ درصد می‌باشد. می توان دید که در $\gamma_d = 1.58 \frac{gr}{cm^3}$ و $\gamma_d = 1.66 \frac{gr}{cm^3}$ رفتار نسبتا مشابهی وجود دارد. اما در $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$ چنین رفتاری قابل مشاهده نیست. برای $\gamma_d = 1.58 \frac{gr}{cm^3}$، مقاومت کششی با افزایش رطوبت ابتدا افزایش و پس از رسیدن به حداکثر مقاومت در رطوبت ۱۸ درصد، کاهش می‌یابد. برای $\gamma_d = 1.66 \frac{gr}{cm^3}$ با افزایش رطوبت ابتدا افزایش اندکی در مقاومت کششی دیده می‌شود و پس از رسیدن به حداکثر مقاومت در رطوبت ۱۸ درصد، مقاومت شروع به کاهش می‌کند. برای $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$ مشاهده شد که با افزایش رطوبت مقاومت کششی کاهش می‌یابد. این نتایج با نظریه مکانیک خاک‌های نیمه اشباع هماهنگی دارد. (Pande and Pietruszczak, 2015).

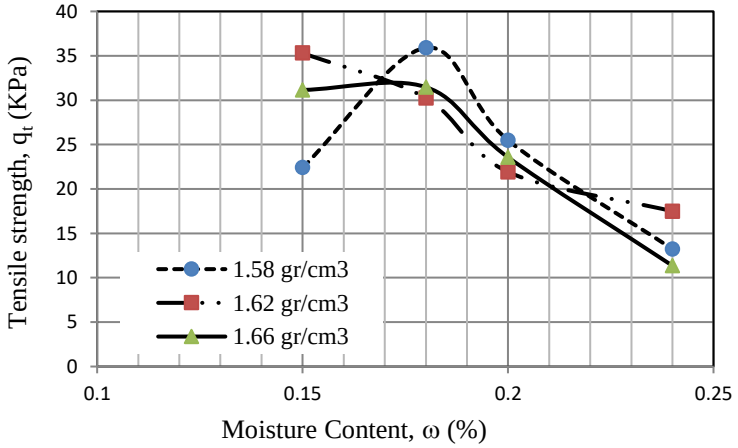



**Fig. 7- Changes in soil tensile strength with moisture content and dry density**

**شکل ۷- تغییرات مقاومت کششی خاک با میزان رطوبت و دانسیته خشک**

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

**اثر افزودن بنتونیت به خاک**

نمونه‌های تعیین اثر بنتونیت، با اضافه کردن بنتونیت به میزان ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۵درصد وزنی خاک خشک، رطوبت ۲۴ درصد و $\gamma_d = 1.62 \frac{gr}{cm^3}$ ساخته شدند. اثر اضافه کردن بنتونیت بر مقاومت کششی خاک در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن بنتونیت، مقاومت کششی تقریباً به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که هر افزایش پنج درصدی بنتونیت، با افزایش ۱/۵ برابری مقاومت کششی خاک همراه است. به نظر می‌رسد مقدار کانی‌های رسی تأثیر به‌سزایی بر مقاومت کششی خاک‌های متراکم دارد. در واقع، کانی‌شناسی یک عامل کنترل کننده اساسی برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی نظیر شکل پذیری، تورم، تراکم، مقاومت و قابلیت هدایت سیال است (Mitchell and Soga.,1993). در شکل (۸) باز هم تکرار پذیری نتایج نشان داده شده است.

**خاک تثبیت شده با آهک**

نمونه‌های تثبیت شده با آهک، با سه درصد وزنی دو درصد، چهار درصد و شش درصد آهک ساخته و پس از ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آن در شکل (۹) قابل مشاهده است. عمده علت افزایش مقاومت خاک با افزودن آهک به آن، بروز واکنش پوزولانی است که بین آهک، آب، سیلیکات و آلومینات موجود در کانی‌های رسی رخ می‌دهد که واکنشی زمان‌بر بوده و به مرور زمان مقاومت خاک را افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد برای خاک‌های تثبیت شده با شش درصد آهک، رابطه مقاومت کششی با زمان عمل‌آوری، روند صعودی تری نسبت به خاک‌های تثبیت شده با دو درصد و چهار درصد آهک دارد. همچنین می‌توان گفت که به غیر از نمونه‌های سه روزه که با درصدهای مختلف آهک، مقاومت کششی تقریباً یکسانی دارند، مقاومت کششی نمونه‌های با زمان عمل‌آوری یکسان، با هر افزایش دو درصدی آهک از دو درصد تا شش درصد ، به‌طور میانگین ۱/۲ برابر افزایش می‌یابد.

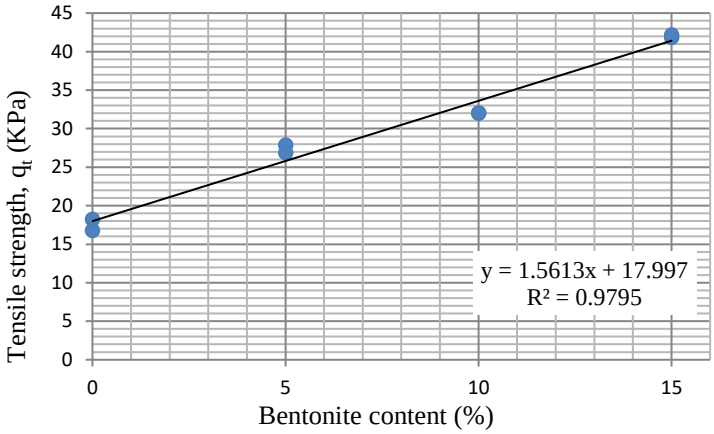



**Fig. 8- Changes in soil tensile strength with bentonite content**

**شکل ۸- تغییرات مقاومت کششی خاک با میزان بنتونیت**

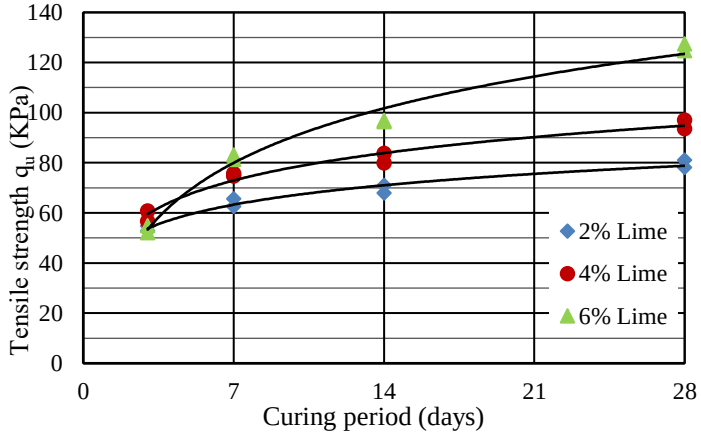



**Fig. 9- Tensile strength changes of lime-stabilized soil with curing time for different lime content.**

**شکل ۹- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با آهک با گذشت زمان برای درصدهای مختلف آهک.**

**خاک تثبیت شده با سیمان و آهک**

برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان، نه ترکیب مطابق جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفت. نمونه ۲۸ روزه دو درصد آهک و هفت درصد سیمان، پس از ۳۱ روز و نمونه‌های ۲۸ روزه تثبیت شده با چهار درصد و شش درصد آهک به‌علاوه مقادیر مختلف سیمان، پس از ۳۲ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های ساخته شده با دو درصد آهک و درصدهای مختلف سیمان در شکل (۱۰) مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، مقاومت کششی این نمونه‌ها روند تقریباً مشابهی با زمان عمل‌آوری دارند. همچنین می‌توان گفت که در نمونه‌های ساخته شده با دو درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، مقاومت کششی نمونه‌های با زمان عمل‌آوری یکسان (به غیر از نمونه‌های ۳ روزه)، با هر افزایش دو درصدی سیمان از سه درصد تا هفت درصد، به‌طور میانگین ۱/۰۵ برابر افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱) نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با چهار درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان را می‌توان مشاهده نمود. نحوه تغییرات مقاومت کششی این نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری، شبیه به هم و همچنین روند نسبتاً مشابهی با نمونه‌های ساخته شده با دو درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان نشان می‌دهند. در این نمونه‌ها، برای زمان عمل آوری‌های یکسان (به جز نمونه‌های سه روزه)، بیشترین مقاومت برای نمونه‌های تثبیت شده با چهار درصد آهک و پنج درصد سیمان به‌دست آمد.

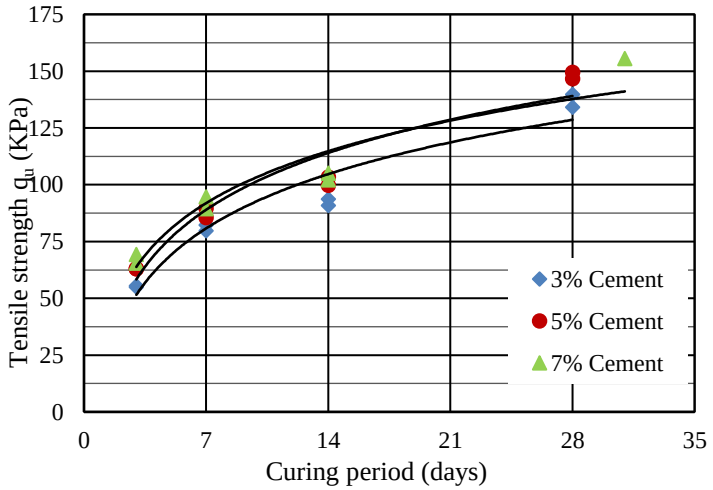



**Fig. 10- Tensile strength changes of soil stabilized with 2% lime and different amounts of cement, with time**

**شکل ۱۰- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با دو درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، با گذشت زمان**

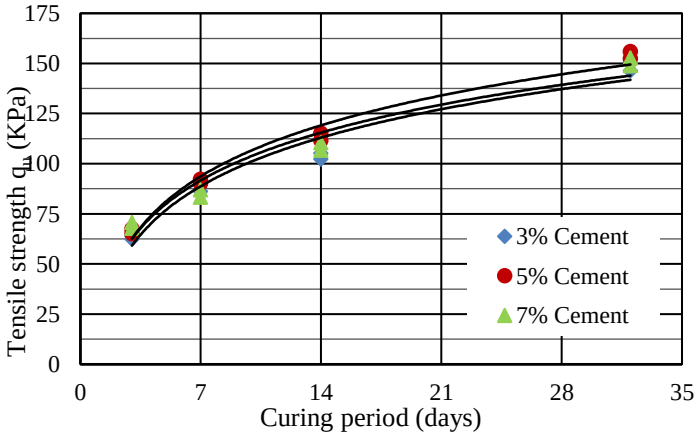



**Fig. 11- Tensile strength changes of soil stabilized with 4% lime and different amounts of cement, with time**

**شکل ۱۱- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با چهار درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، با گذشت زمان**

DOI: 10.22055/jise.2024. 47522.2129

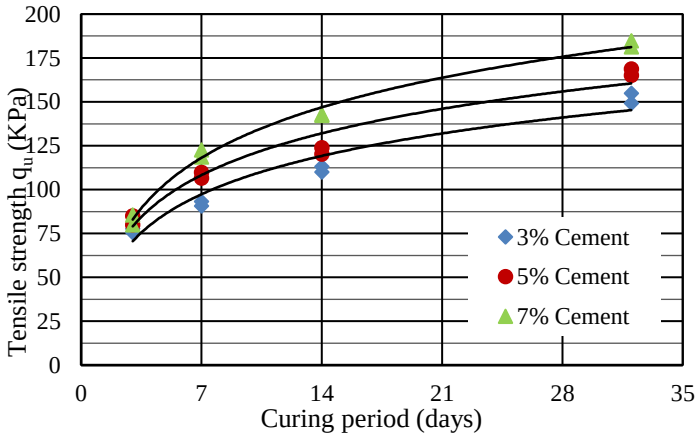



**Fig. 12- Tensile strength changes of soil stabilized with 6% lime and different amounts of cement, with time**

**شکل ۱۲- تغییرات مقاومت کششی خاک تثبیت شده با شش درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان، با گذشت زمان**

شکل (۱۲) نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با شش درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی این نمونه‌ها نشان می‌دهند که روند تغییرات مقاومت کششی این نمونه‌ها در مقابل زمان عمل‌آوری، تقریباً شبیه به‌هم و مشابه نمونه‌های تثبیت شده با دو درصد و چهار درصد آهک و مقادیر مختلف سیمان بوده، البته به‌جز برای نمونه‌های تثبیت شده با شش درصد آهک و هفت درصد سیمان که روند صعودی بیشتری دارند. همچنین مقاومت کششی این نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری یکسان (به غیر از نمونه‌های سه روزه)، با هر افزایش دو درصدی سیمان از سه درصد تا هفت درصد، ۱/۱ برابر افزایش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

این پژوهش بر روی ارزیابی عوامل مؤثر بر مقاومت کششی خاک و همچنین بررسی اثر تثبیت خاک با استفاده از آهک و سیمان بر مقاومت کششی خاک متمرکز شده بود. آزمایش‌ها در دستگاه کشش مستقیمی که برای انجام آزمایش‌ها ساخته شده بود، انجام گرفت. در کل، بر اساس آزمایش‌ها و همچنین مشاهدات به‌عمل آمده، می‌توان به نتایجی که در ادامه آمده است اشاره کرد:

- ✓ با توجه به تکرار نتایج تست‌ها برای نمونه‌های با شرایط مختلف، عملکرد وسیله ساخته شده برای بررسی مقاومت کششی انواع نمونه‌های خاک‌های مناسب بود است.
- ✓ ترک خوردگی نمونه‌های نرم‌تر بدین صورت بود که ابتدا در کناره‌ها ترک ظاهر می‌شد و به سمت وسط نمونه گسترش می‌یافت. در نمونه‌های متراکم و سخت ترک به‌صورت ناگهانی در سرتاسر نمونه ظاهر می‌شد. نمونه‌های سخت‌تر دارای بازشدگی ترک بزرگتری بودند. این شکلهای بروز ترک با نتایج Wei et al (2022) تأیید شده است.
- ✓ با افزایش سرعت کرنش اعمال شده مقاومت کششی ابتدا افزایش یافته ولی بعد از آن کاهش می‌یابد. دلیل آن سرعت تغییرشکل‌ها و عدم امکان ایجاد اتصالات الکتریکی در بین ذرات می باشد. در سرعت بارگذاری ۰/۲۴ میلی‌متر در دقیقه بیشترین مقاومت کششی حاصل شده است. از این سرعت بارگذاری در تست‌ها استفاده شد.
- ✓ میزان رطوبت اثر قابل‌توجهی بر مقاومت کششی خاک‌های متراکم دارد که می‌تواند به‌دلیل تغییر ساختار خاک به‌علت تجدید آرایش ذرات خاک باشد. همچنین در یک دانسیته خشک ثابت، با افزایش رطوبت، مقاومت کششی ابتدا افزایش و بعد کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در وزن مخصوص خشک ($gr/cm^3$) ۱/۵۸ با سه درصد افزایش رطوبت، مقاومت کششی حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است. با افزایش وزن مخصوص خشک تأثیر آن کمتر شده، به‌گونه‌ایی که در وزن مخصوص خشک ($gr/cm^3$) ۱/۶۶ افزایش رطوبت، تأثیر خاصی روی مقاومت کششی نداشته است. این نتیجه به‌وضوح در Trabelsi et al (2012) گزارش شده است. دلیل این پدیده گذر از حالت اشباع پایین به حالت اشباع بالاتر از حد رطوبت آستانه است. در اشباع پایین با تشکیل کشش سطحی و فشار آب منفی مقاومت افزایش می‌یابد. لیکن در درجه اشباع بالا و افزایش آب منفذی در کرنش‌های حجمی فشار آب در نمونه تولید شده و باعث افت مقاومت می‌شود.
- ✓ افزودن بنتونیت اثر قابل‌توجهی بر مقاومت کششی دارد. به‌طوری‌که هر افزایش پنج درصدی بنتونیت، با افزایش ۱/۵ برابری مقاومت کششی خاک همراه است. به نظر می‌رسد مقدار کانی‌های رسی تاثیر بسزایی بر مقاومت کششی خاک‌های متراکم دارد.
- ✓ در بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری روی مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک مشاهده شد که با افزایش زمان

عمل‌آوری، مقاومت کششی نمونه‌های تثبیت شده نیز افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در نمونه‌های تثبیت شده با چهار درصد آهک مقاومت نمونه‌ها با افزایش زمان از هفت روز به ۱۴ روز ۲۵ درصد افزایش یافته است. و با گذشت زمان نرخ افزایش مقاومت کششی کاهش یافته است. دلیل این امر پیشرفت واکنش پوزولانی به مرور زمان است. که البته می‌توان انتظار داشت میزان افزایش مقاومت کششی با گذشت زمان عمل‌آوری روند کاهشی داشته باشد. این مطلب به‌طور مشابهی برای هر دو نوع مواد تثبیت کننده صادق بوده، ولی سرعت افزایش در نمونه های با شش درصد آهک و هفت درصد سیمان بیشتر و سریع‌تر بوده است. این امر می‌تواند به‌دلیل وجود مواد افزودنی بیشتر باشد.

## تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشکده مهندسی عمران و معماری دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه SCU.EC96.824 تشکر و قدردانی می‌گردد.

## References

1- Abbasi, M., Shooshpasha, E., and Molaabasi, H. 2017. Investigation of zeolite effect on tensile strength of Babolsar sand stabilized with cement. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(1.1), pp. 117-120. Doi: 10.24200/j30.2017.1104 (in Persian).

2- Adhikari, S., 2017. *Mechanical properties of soil-rap-geopolymer for the stabilization of road base/subbase*. University of Louisiana at Lafayette.

3- Ajaz, A. and Parry, R.H.G., 1974. An unconfined direct tension test for compacted clays. *Journal of Testing and Evaluation*, *2*(3), pp.163-172. https://doi.org/10.1520/JTE10093J

4- Alzubaidi, R. and Lafta, S.H., 2013. Effect of strain rate on the strength characteristics of soil–lime mixture. *Geotechnical and Geological Engineering*, *31*, pp.1317-1327.https://doi.org/10.1007/s10706-013-9653-3.

5- Bulolo, S., Leong, E.C., and Kizza, R., 2021. Tensile strength of unsaturated coarse and fine-grained soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80(3), pp. 2727-2750. https://doi.org/10.1007/s10064-020-02073-6.

6- Cao, S., Yilmaz, E., Song, W., Yilmaz, E. and Xue, G., 2019. Loading rate effect on uniaxial compressive strength behavior and acoustic emission properties of cemented tailings backfill. *Construction and Building Materials*, *213*, pp.313-324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.082.

7- Causarano, H., 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*, *28*(1), pp.15-25. https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90052-Q

8- Chen, C., Peng, Z., Gu, J., Peng, Y., Huang, X. and Wu, L., 2020. Exploring environmentally friendly biopolymer material effect on soil tensile and compressive behavior. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), p.9032.

9- Dagar, V. and Cokca, E., 2021. A Study on Tensile Strength of Compacted Fine-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering, 39*(4-5), pp. 751–764. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01519-8

10- Gao, Y., Li, Z., Cui, W., Sun, D. & Yu, H., 2023. Effect of initial void ratio on the tensile strength of unsaturated silty soils, *Acta Geotechnica, 18(7), pp. 3609-3622.* https://doi.org/10.1007/s11440-023-01800-z

11- Ghalandarzadeh, A., Abdi, M.R. and Shafiei Chafi, L., 2021. Construction of a new hollow cylinder apparatus to study the tensile behavior of clay with different plasticity indices. *Civil Infrastructure Researches*, *7*(1), pp.153-171.

12- Hasegawa, H. and Ikeuti, M., 1966. On the tensile strength test of disturbed soils. In *rheology and soil mechanics/Rhéologie et Mécanique des Sols: Symposium Grenoble, April 1–8, 1964/Symposium Grenoble, 1er–8 avril 1964* (pp. 405-412). Berlin, heidelberg: springer berlin heidelberg.

13- He, S., Bai, H. and Xu, Z., 2018. Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess. *Energies*, *11*(8), p.1974. https://doi.org/10.3390/en11081974.

14- Hosseinpour Babaei, I., Rizvani Tochahi, R. and Kavesh Meli, M., 2023. Laboratory investigation of the behavior of clay stabilized with cement and reinforced with geotextile sheets. *Structural and Construction Engineering*, 10(7), pp. 74-91. Doi: 10.22065/jsce.2023.365452.2949 (in Persian).

15- Hu, T., Liu, D. and Chang, J., 2020. Experimental study on strain rate effect of strength characteristics of unsaturated silty clay. *Case Studies in Construction Materials*, *12*, p.e00332.https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00332

16- Indiramma, P., Sudharani, C. and Needhidasan, S., 2020. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment–an experimental study. *Materials Today: Proceedings*, *22*, pp.694-700. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.147

17- Ji, E., Chen, S., Fu, Z., 2020. A Simple Method to Predict Tensile Strength of Gravelly Soil Using Shear Strength Indexes. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57(4), pp. 312–315. https://doi.org/10.1007/s11204-020-09671-2

18- Kim, T.H., and Hwang, C., 2003, Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content. *Engineering Geology*, 69(2), pp:233–244. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00284-3

19- Mirzaei, K., Ghanizadeh, a. and Bakhtiari, S., 2021. Resistance characteristics of clay bed with high pasty properties stabilized with iron smelting furnace slag, fly ash and diatomite. *Civil Infrastructure Research*, 6(2), pp. 67-78. Doi: 10.22091/cer.2021.6858.1241 (in Persian).

20- Mitchell, J.K. and Soga, K., 1993. Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons. *Inc., New York*, *422*.

21- Mohseninia, M. and Salehzadeh, H., 2023. Effect of initial conditions of soil and its environment on the tensile strength of sandy soil improved with Persian gum. *Transportation Infrastructure Engineering*, 9(2), pp. 51-62. Doi: 10.22075/jtie.2023.31178.1644 (in Persian).

22- Naeini, S.A., Naderinia, B. and Izadi, E., 2012. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *16*, pp.943-949.

23- Nahlawi, H., Chakrabarti, S. and Kodikara, J., 2004. A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials. *Geotechnical Testing Journal*, *27*(4), pp.356-361. https://doi.org/10.1520/GTJ11767

24- Ohkubo, S., 2002. Dynamic quality and constitution equation for dotan soil. *Tunnel and Underground*, *33*(1), pp.45-50.

25- Ono, N., 2003. Trial tests with compressive and tensile strength measuring apparatus. *58th Annu. Meet. Jpn. Soc. Civil Engineers, 2003*.

26- Peters, J.F. and Leavell, D.A., 1988. Relationship between tensile and compressive strengths of compacted soils. In *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP29077S

27- Pande, G.N., and Pietruszczak, S., 2015. On unsaturated soil mechanics. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *37*(3): pp. 73-84. https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0035.

28- Rezaei Moghadam, F., Jafari Nader, B. and Rezaei Moghadam, T., 2021. Laboratory investigation of the effect of polymer additive "Nicoflak" on the compressive and tensile strength of desert and coastal sandblasts in pavement layers. *Amirkabir Engineering Journal*, 53(2), pp. 733-748. doi: 10.22060/ceej.2020.16612.6288 (in Persian).

29- Tamrakar, S.B., Toyosawa, Y., Mitachi, T. and Itoh, K., 2005. Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus. *Soils and Foundations*, *45*(6), pp.103-110. https://doi.org/10.3208/sandf.45.103.

30- Tang, C.S., Pei, X.J., Wang, D.Y., Shi, B. and Li, J., 2015. Tensile strength of compacted clayey soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(4), p.04014122. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001267

31- Trabelsi, H., Jamei, M., Zenzri, H. and Olivella, S., 2012. Crack patterns in clayey soils: Experiments and modeling. *International Journal for Numerical and Analytical methods in geomechanics*, *36*(11), pp.1410-1433. https://doi.org/10.1002/nag.1060

32- Tschebatorioff, F.P., 1953. The tensile strength of disturbed and recompacted soils. *Proc. 3rd ICSMFE, 1953, 1*, pp.207-210.

33- Wang, A., Xu, S. and Xu, Y., 2024. The Uniaxial Tensile Strength of Compacted Expansive Soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *28*(6), pp.2189-2200.https://doi.org/10.1007/s12205-024-0660-0

34- Wei, X., Yang, Z., Fleureau, J.M., Hattab, M., Taibi, S. and Xu, L., 2022. Tensile strength identification of remolded clayey soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *81*(10), p.405.https://doi.org/10.1007/s10064-022-02879-6

35- Wisetsaen, S., Walsri, C., Fuenkajorn, K., 2015, Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp:10-14. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.10.005

36- Xiu, Z., Wang, S., Ji, Y., Wang, F., Ren, F. and Nguyen, V.T., 2021. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB). *Construction and Building Materials*, *271*, p.121526. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121526

37- Yin, P., Vanapalli, S.K. 2018. Model for predicting tensile strength of unsaturated cohesionless soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(9):1313–1333, https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0376.

38- Zarei, C., Soltani-Jigheh, H. and Liu, Y., 2023. Effects of strain rate and specimen size on the Behavior of Fine-Grained soils. *Arabian Journal of Geosciences*, *16*(4), p.244. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11344-x.

39- Zhang, Z., Ji, E. and Fu, Z., 2022. Study on the tensile properties and application of gravelly soil reinforced by polypropylene fiber. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *26*(8), pp.3265-3274.https://doi.org/10.1007/s12205-022-0923-6.

40- Zhou, W., Li, S.L., Ma, G., Chang, X.L., Cheng, Y.G. and Ma, X., 2016. Assessment of the crest cracks of the Pubugou rockfill dam based on parameters back analysis. *Geomechanics & Engineering*, *11*(4), pp.571-585.https://doi.org/10.12989/.2016.11.4.571.

**In The Name of God**

# Irrigation Sciences and Engineering

(Scientific)

**Vol. 48 (1)** **Spring 2025**

**Board of Editors**

| | | |
|---|---|---|
| **AkhondAli, A. M.** | **Professor** | **Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran** |
| **Ghomeshi, M** | **Professor** | **Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran** |
| **Heydarpour, M.** | **Professor** | **Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology** |
| **Kashefipour, S. M.** | **Professor** | **Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran** |
| **Liaghat, A. M.** | **Professor** | **Faculty of Agriculture, University of Tehran** |
| **Hosseinzadeh Dalir, A.** | **Professor** | **Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.** |
| **Naseri, A. A.** | **Professor** | **Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran** |
| **Zand Parsa, Sh.** | **Professor** | **Faculty of Agriculture, Shiraz University of Technology** |
| **Pagliara, Stefano.** | **Professor** | **Department of Civil Engineering, University of Pisa,Italy** |
| **Sai Hin, L.** | **Associate Professor** | **Department Of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Maliysia** |
| **Ahmadian, R.** | **Professor** | **Department of Civil Engineering, School of Engineering, Cardiff University, UK** |
| **Ritzema, H.** | **Associate Professor** | **Water Resources Management Group, Environmental Sciences Group, Wageningen University & Research, Netherland** |

**Published by: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water Sciences Engineering, Ahvaz, Iran.**
**Director: BoromandNasab, S.**
**Editor-in-Chief: Kashefipour, S.M.**
**Editorial Manager: Yazdani, N**
**Type Setting: Yazdani, N.**

**E–mail: JISE.Water@Scu.ac.ir**
**JISE.Water@yahoo.com**

Publication license of the Ministry of Culture and Islamic Guidance No. 10362/124 on 29/12/1998 and license of the Journal Review Office of the Ministry of Science, Research and Technology No. 11/3/1264 on 21/10/2009 for the Journal of Irrigation Sciences and Engineering.

Journal of
Irrigation Sciences and Engineering(JISE)
(Scientific)
ISSN 2588-5952
Vol. 48 (1)
Spring 2025

Iranian Hydraulic Association
Shahid Chamran University of Ahvaz
Faculty of Water Sciences Engineering

Contents


| Title | Authors | Page |
|---|---|---|
| **Merging rainfall data of ground and satellite measurements in order to correct and improve the performance of data at the catchment area (Case study: Mond Basin)** | A. Eskandari, H. Zarei, A. Hoshmand and A. Akhondali | **1** |
| **Investigation of Temporal and Spatial Changes in the Occurrence of Frost in Isfahan Province Using the Models of the Sixth Climate Change Report** | E. Mazaheri, J. Abedi Koupai, M. Heidarpor, M. J. Zareian and S.A. Gohari | **21** |
| **Assessing the Economic Efficiency of Water Distribution in the Agricultural Sector through Crop Pattern Modification (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network)** | H. Mazandarani Zadeh and S. M. Hosseini | **39** |
| **Determining single and dual crop coefficients and standard evapotranspiration of onion using water balance lysimeter** | F. Razzaghi, M. Esmaily and A. R. Sepaskhah | **59** |
| **Comparing the performance of machine learning methods in modeling daily reference ET and its spatial distribution (case study: Zanjan province)** | S. Ganjei and A. H. Nazemi | **77** |
| **Revealing climatic changes in reference evapotranspiration in Kermanshah province using the water requirement system** | M. Jovzi, N. A. Ebrahimi Pak and S. N. Hosseini | **93** |
| **Water quality assessment of Gamasiab River using heavy metal pollution indicators in spring and summer** | M. Ebrahimian Najafabadi, A. Ildoromi, S. Mortazavi and E. Mohammadimanesh | **113** |
| **Investigation of the Effect of Strain Rate and Moisture on the Direct Tensile Strength of Clay Soils Stabilized with Bentonite, Lime, and Cement** | M. Oulapour, M. Ghareineh and S. A. Hosseini Dehdashti | **127** |