



پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم



دوره دوم، شماره اول، پیاپی ۵، بهار ۱۴۰۳

- ۱ ارزیابی کیفیت پساب تصفیه خانه فاضلاب شهر شیراز جهت استفاده مجدد در بخش کشاورزی در شرایط خشکسالی با استفاده از شاخص های NSFQI، IRWQI و OWQI
هانیه قاندى، مهدى بهرامى
- ۱۵ حفظ و احيا تالاب هامون: راهكارى مشترك براى ايران و افغانستان در زمينه مواجهه با پديده تغيير اقليم
محمد رضا فرزانه، فائزه بنى مصطفى عرب، سحر حسين همارشيد
- ۳۹ پايش و ارزشيابى ويژگى هاى مكانى و زمانى خشكسالى در ايران با استفاده از سنجش از دور
محدثه السادات فخار، بيژن نظرى
- ۵۹ تعيين نياز آبى گونه هاى كاج تهران و زيتون تلخ در سنين مختلف رويشى تحت شرايط تنش خشكى
محمد عسگرى، وحيد اعتماد، خالد احمدآلى، احسان عيدى، سلمان زارع، محسن جوانميرى پور
- ۷۷ اولويت بندى عوامل مؤثر بر خشكسالى با استفاده از روش سلسله مراتبى فazy (مورد مطالعه: شهرستان تربت حيدريه)
اميررضا رضائى، عليرضا روشنى
- ۹۳ ارزشيابى تغييرات خشكسالى ايران با شاخص خودتنظيم پالمر
سيد محمود حسيني صديق، مسعود جلالى
- ۱۰۷ شبیه سازی رشد و نمو کینوا در مناطق خشک با نرم افزار DSSAT 4.7 در شرایط مزرعه
شهاب اقبالی شاه آباد، مهدى نصيرى محلاتى، محسن جهان، محمد حسن فلاح





Evaluating the quality of Shiraz wastewater treatment plant effluent for agricultural uses in drought conditions utilizing IRWQI, NSFQI, and OWQI indicators

Hanie Ghaedi¹, Mehdi Bahrami^{2*}

1. MSc Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

2. Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Fasa University, Fasa, Iran.

*Corresponding Author: bahrami@fasau.ac.ir

Keywords:

Agriculture, Shiraz sewage treatment plant, Wastewater, Water quality, Water quality index.

Extended Abstract

Introduction

The utilization of non-conventional water sources, such as saline water, drainage, and sewage, has proven to be highly effective in managing droughts given the limitations of the country's water resources. The primary advantage of utilizing effluent from urban wastewater treatment plants is the stability of these sources, their accessibility, and their low cost for irrigating agricultural lands, which ultimately addresses the issue of water scarcity. Studies have shown that using sewage for irrigation doesn't harm agricultural products. However, some long-term studies have reported contamination with heavy metals and a decrease in soil quality in the irrigated area due to sewage irrigation. Water quality indices are an effective and straightforward method of assessing the condition and status of water. These indicators use multiple water quality parameters to determine the water's health through a mathematical formula, producing a single numerical value. The value is then classified on a relative scale from poor to excellent, making it useful for managing, analyzing, and monitoring water quality changes over time and space.

Materials and Methods

In this study, the quality of Shiraz urban sewage treatment plant effluent was evaluated for agricultural purposes by calculating the Iranian water quality index (IRWQI), National Sanitation Foundation of America water quality index (NSFWQI), and the Oregon water quality index (OWQI) using daily data from 2018 to 2019. The wastewater treatment plant in Shiraz City is situated on 72-hectares of land in the southeast region of the city. The plant currently serves a population of 409,000 people, and it is expected to cater for a final population of 584,000 people. The transmission lines discharge an average of 1360 l/s, with a maximum discharge of 2600 l/s. Nine parameters were selected to calculate the NSFQI index, including turbidity,

Received:

30 July 2023

Revised:

19 September 2023

Accepted:

20 September 2023

How to cite this article:

Ghaedi, H., & Bahrami, M. (2024). Evaluating the quality of Shiraz wastewater treatment plant effluent for agricultural uses in drought conditions utilizing IRWQI, NSFQI, and OWQI indicators. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(1), 105-118. [10.22077/JDCR.2023.6628.1035](https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6628.1035)



temperature, phosphate, nitrate, coliform, biological oxygen demand (BOD), total dissolved solids (TDS), dissolved oxygen (DO), and PH. The OWQI quality index is similar to the NSFQI index but includes eight parameters: temperature, dissolved oxygen, biological oxygen demand, PH, nitrogen, total phosphorus, total dissolved solids, and fecal coliform.

Results and Discussion

The analysis of the average quality parameters obtained from the relevant tests conducted by Shiraz Water and Sewerage Company indicates that the biological oxygen demand (BOD) concentration was consistently above 30 mg/L in all months. According to the standard, since the sub-index met a minimum value of 2, its changes did not affect the water quality index. The PH level was appropriate throughout all seasons, and it did not vary significantly. Therefore, it did not play a significant role in determining the water quality index. On the other hand, the total dissolved solids concentration exceeded 500 mg/L in all seasons, and the sub-index met a minimum value of 20. Thus, its changes also did not affect the water quality index. Also, the results showed that the average NSFQI values varied between 28.73 and 31.54 in different months, indicating poor quality. The monthly OWQI values ranged from 4.38 to 7.95, indicating very poor quality. The IRWQI index, which was calculated using 11 parameters, confirms the results of the other two indices. By using a combination of treated wastewater and high-quality water, we can irrigate our crops while reducing the amount of freshwater we use. This can be done directly using treated wastewater or by improving its quality through drip irrigation and subsurface irrigation systems.

Conclusion

The results of the studied indices revealed that the effluent of the Shiraz wastewater treatment plant is of poor quality. Therefore, given the low quality of the effluent, it is recommended for use only in irrigating non-productive plants, forest parks around Shiraz, and a limited part of urban green space.



ارزیابی کیفیت پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهر شیراز جهت استفاده مجدد در بخش کشاورزی در شرایط خشکسالی با استفاده از شاخص‌های IQWO و IQWFSN، IQWRI

هانیبه قانیدی^۱، مهدی بهرامی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران.

*نویسنده مسئول: bahrami@fasau.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

استفاده از آب‌های نامتعارف از جمله آب‌های شور، زه‌آب‌ها و پساب با توجه به محدودیت‌های منابع آبی کشور در مدیریت خشکسالی بسیار مؤثر است. مهم‌ترین مزیت استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های شهری، ثابت بودن این منابع، سهولت دسترسی و قیمت ارزان آن برای آبیاری زمین‌های کشاورزی یا به بیان دیگر حل مشکل کمبود آب می‌باشد. در این پژوهش شاخص کیفیت منابع آب ایران (IRWQI)، شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت آمریکا (NSFWQI) و شاخص کیفیت آب اورگان (OWQI) با استفاده از داده‌های روزانه تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شیراز طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ محاسبه گردید و کیفیت پساب خروجی برای مصارف کشاورزی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نظر افراد متخصص نه پارامتر کدورت، دما، فسفات، نیتрат، کلیفرم، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD)، مواد جامد کل (TDS)، اکسیژن محلول (DO) و pH جهت محاسبه شاخص NSFWQI برای تصفیه‌خانه شهر شیراز انتخاب گردید. شاخص کیفی OWQI همانند شاخص NSFWQI است با این تفاوت که حاوی هشت پارامتر شامل دما، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، pH، نیتروژن، فسفر کل، کل جامدات محلول و کلیفرم مدفوعی می‌باشد. نتایج نشان داد مقادیر میانگین شاخص NSFWQI در ماه‌های مختلف بین ۲۸/۷۳ تا ۳۱/۵۴ بود که در طبقه کیفیت ضعیف قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس مقادیر OWQI ماهانه که در بازه ۴/۳۸ تا ۷/۹۵ قرار می‌گیرد کیفیت این پساب خیلی ضعیف است. شاخص IRWQI نیز که با استفاده از ۱۱ پارامتر محاسبه گردید مؤید نتایج دو شاخص دیگر است. پساب با چنین کیفیتی را می‌توان صرفاً برای آبیاری گیاهان غیرمثمر و پارک‌های جنگلی اطراف شیراز و حتی قسمتی از فضای سبز شهری به کار برد.

پساب، تصفیه‌خانه فاضلاب شیراز، شاخص کیفیت آب، کشاورزی، کیفیت آب.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۷/۰۸

مقدمه

رشد جمعیت و صنعتی شدن جامعه جهانی از یک سو و گسترش خشکسالی حاصل از تغییرات آب و هوایی از سوی دیگر مهم‌ترین متغیرهای محدود کننده منابع آب به‌منظور امنیت تولیدات غذایی در کشورهای در حال توسعه واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آیند (Faramarzi, 2010). بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط موسسه بین‌المللی مدیریت آب، ایران در سال ۲۰۲۵ بر اثر رشد جمعیت و توسعه کشاورزی صنعت و نیز توسعه شهرنشینی جزء کشورهای دارای کمبود فیزیکی آب دسته‌بندی خواهد شد (Ehsani, 2005). در حال حاضر حدود ۹۳ درصد از کل آب مصرفی ایران صرف آبیاری حدود ۸/۵ میلیون هکتار از اراضی زراعی شده و سهم بخش شرب و صنعت به ترتیب ۵/۸ و ۱/۲ درصد می‌باشد. پتانسیل خانگی تولید در سطح کشور بر اساس آخرین سرشماری رسمی کشور به تفکیک شهری، روستایی و کل به ترتیب معادل ۳۶۷۰، ۷۲۷ و ۴۴۰۰ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد (Khosravi and Dehzad, 2013). با توجه به محدودیت‌های منابع آبی کشور، استفاده از آب‌های نامتعارف شامل آب‌های شور، زهاب‌ها و فاضلاب‌های تصفیه شده در مدیریت خشکسالی بسیار مؤثر است و یکی از راه‌های توسعه بخش کشاورزی و صنعتی محسوب می‌گردد (Rohani Shahraki et al., 2005). استفاده مجدد از فاضلاب موضوع جدیدی نیست زیرا حدود ۹۹/۹ درصد فاضلاب را آب تشکیل می‌دهد و ۰/۱ درصد باقی‌مانده فاضلاب از مواد آلی و معدنی معلق و یا محلول تشکیل شده است (Tchobanoglus et al., 2003).

در حال حاضر در سطح کشور به‌ویژه در حواشی شهرهای بزرگ و مراکز استان‌ها مناطق وسیعی با پساب‌ها، آب‌های برگشتی و رواناب‌های شهری آبیاری می‌شوند. در بیشتر مواقع این استفاده غیراصولی بوده و برای کشت سبزیجات و صیفی‌جات به‌کار رفته و موجب آلودگی محیط زیست، تجمع آلودگی در خاک و انتقال آن به محصولات تولیدی شده است. با توجه به میزان استقبال و همچنین نیاز به استفاده از پساب‌ها و آب‌های برگشتی در کشاورزی، در حال حاضر بیشتر

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در سطح کشور با هدف استفاده مجدد از پساب حاصل در کشاورزی، طراحی و اجرا می‌گردند. با وجود قدمت استفاده از فاضلاب در کشور، تحقیقات در زمینه اثرات مربوطه در یکی دو دهه اخیر آغاز شده است (Khosravi and Dehzad, 2013). سابقه استفاده از پساب در ایران به عهد صفویه (۱۷۲۲-۱۵۰۱ میلادی) برمی‌گردد، به‌طوری که در اصفهان فاضلاب بسیاری از خانه‌های قدیمی شهر به نه‌های موسوم به مادی تخلیه می‌شد که این نه‌ها برای آبیاری زمین‌های کشاورزی به‌کار می‌رفته‌اند (Mohammadi, 2008). مهم‌ترین مزیت استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های شهری به‌شمار آمدن آن به‌عنوان یک منبع ثابت، در دسترس بودن و قیمت ارزان برای آبیاری زمین‌های کشاورزی یا به بیان دیگر حل مشکل کمبود آب می‌باشد. از دیگر مزایای استفاده مجدد از پساب می‌توان به امکان بازیابی مواد مغذی موجود در پساب و کاهش استفاده از کودها و رفع مشکلات مربوط به دفع پساب و شارژ مجدد آب‌های زیرزمینی اشاره کرد (Heidarpour et al., 2007).

طبق مطالعات صورت گرفته، آبیاری با پساب تأثیر منفی بر محصولات مختلف کشاورزی ندارد اما در برخی مطالعات که به بررسی آثار بلندمدت آبیاری با پساب در خاک پرداخته شده است آلودگی به فلزات سنگین و کاهش کیفیت خاک محل تحت آبیاری گزارش گردیده است. از سوی دیگر استفاده از پساب جهت آبیاری به‌دلیل وجود پاتوژن‌ها می‌تواند موجب افزایش مخاطرات بهداشتی و ریسک ابتلا به عفونت‌های روده شود. بدین ترتیب به منظور جلوگیری از اثرات مخرب بهداشتی و زیست محیطی، بررسی کیفی پساب قبل از استفاده مجدد ضروری است (Al-Lahham et al., 2003). ناصری و همکاران (Nasseri et al., 2012) در بررسی کیفیت پساب تصفیه‌خانه فاضلاب اردبیل به منظور استفاده مجدد در کشاورزی به این نتیجه رسیدند که این پساب بجز از نظر کلیفرم‌های کل و مدفوعی محدودیتی برای استفاده در کشاورزی ندارد. گندزدایی پساب و پایش مداوم خروجی تصفیه‌خانه از نظر برآوردن استاندارد

(ب) شاخص مصارف ویژه: در این شاخص طبقه‌بندی کیفیت بر اساس نوع مصرف صورت می‌گیرد.
(ج) شاخص‌های طراحی: ابزاری پویا که کمک به سنجش تصمیمی برای برنامه‌ریزی آبی می‌باشد.
(د) شاخص‌های آماری: در این شاخص‌ها از روش‌های آماری استفاده شده و نظرهای شخصی کمتر در آن وارد می‌شود.

(ه) شاخص‌های بیولوژیکی: این نوع شاخص‌ها عموماً کیفیت آب را بر اساس تأثیرات آن بر حیات ارزیابی می‌کند.

به عنوان مثال آقاجانلو و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از شاخص‌های IRWQI و WAWQI (Weighted arithmetic water quality index) کیفیت آب رودخانه کارون را در دو ایستگاه ملاتانی و اهواز مورد ارزیابی قرار دادند (Aghajanloo et al., 2022). همچنین عین‌الهی پیر و همکاران (Einollahipeer et al., 2020) کیفیت پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل در استان سیستان و بلوچستان را بر اساس استانداردهای مربوطه تعیین نمودند و امکان کاربری پساب تصفیه شده در کشاورزی و آبی‌پرووری را با استفاده از مدل Canadian (water quality index) مورد بررسی قرار دادند.

لذا هدف این پژوهش، بررسی قابلیت استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شیراز در مصارف کشاورزی با استفاده از شاخص‌های کیفیت منابع آب ایران (IRWQI)، کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت آمریکا (NSFWQI) و کیفیت آب اورگان (OWQI) در بازه ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تصفیه‌خانه فاضلاب شهر شیراز در ناحیه جنوب شرقی شهر شیراز در زمینی به مساحت ۷۲ هکتار واقع شده است (شکل ۱). جمعیت تحت پوشش فعلی این تصفیه‌خانه ۴۰۹۰۰۰ نفر می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود جمعیت تحت پوشش نهایی آن به ۵۸۴۰۰۰ نفر برسد. متوسط و حداکثر دبی خطوط انتقال در این تصفیه‌خانه به ترتیب ۱۳۶۰ و ۲۶۰۰ لیتر در ثانیه می‌باشد. نوع سیستم تصفیه فاضلاب این تصفیه‌خانه لجن فعال می‌باشد و شامل واحدهای آشغالگیر،

استفاده از پساب در کشاورزی و همچنین ارتقاء تصفیه‌خانه فوق ضروری می‌باشد. انبیر و نوری (Anbir and Noori, 2018) نیز نشان دادند که کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه اکباتان از نظر همه پارامترها در مقایسه با استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست مطابقت دارد و این پساب قابلیت استفاده در آبیاری فضای سبز و کشاورزی را دارا می‌باشد.

تلاش برای طبقه‌بندی آب بر اساس درجه خلوص آن به اواسط قرن بیستم برمی‌گردد. کیفیت آب در هر محل منعکس‌کننده‌ی اثر عوامل مختلف مانند پارامترهای زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی و منابع آلاینده انسانی می‌باشد. پایش کیفیت منابع آب اغلب موجب تولید داده‌های پیچیده‌ای می‌شود که حاوی اطلاعات غنی درباره رفتار منابع می‌باشد که نیاز به روش‌هایی برای تحلیل و تفسیر دارند. در این میان طبقه‌بندی، تحلیل آماری داده‌ها و شبیه‌سازی از مهم‌ترین بخش‌های ارزیابی کیفیت آب می‌باشند. به دلیل اینکه اندازه‌گیری کل پارامترهای کیفی آب مشکل است و یا به عبارتی وقت‌گیر و هزینه‌بر است، از شاخص کیفیت آب استفاده می‌شود. همچنین مقایسه مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده با مقادیر استاندارد آب‌ها یک روش قدیمی و ساده بوده که نمی‌تواند یک تصویر جامع و قابل فهم برای عموم از وضعیت کیفیت آب در منطقه‌ای خاص را نشان دهد. شاخص‌ها ابزاری مناسب و ساده برای تعیین وضعیت و شرایط کیفیت آب هستند که در آن داده‌های چند پارامتر کیفی آب در یک فرمول ریاضی گنجانده می‌شود و با یک عدد میزان سلامت آب را نشان می‌دهد. این عدد با یک مقیاس نسبی که گویای کیفیت آب از بسیار بد تا عالی است، دسته‌بندی می‌شود تا برای مدیریت و تحلیل کیفیت آب و همچنین پایش تغییرات کیفی آب در طول زمان و مکان مورد استفاده قرار گیرند. به‌طور کلی شاخص‌های کیفیت آب به پنج گروه اصلی تقسیم می‌شوند (Meftah Halaghi, 2011; Ensink et al., 2005):

(الف) شاخص‌های عمومی: در این نوع شاخص‌ها طبقه‌بندی کیفی آب صرف نظر از نوع مصرف آن صورت می‌گیرد.

کيفى از پارامترهاى اندازه‌گيرى شده توسط شرکت آب و فاضلاب شيراز طى سال‌هاى ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ استفاده گرديد.

ته‌نشيني اوليه، سلکتور، حوضچه هوادهى، حوضچه ته‌نشيني ثانويه و واحد کلرزنى مى‌باشد (Jahed et al., 2013). در اين پژوهش براى محاسبه شاخص‌هاى



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Geographical location map of Case Study

بر اساس نظر افراد متخصص نه پارامتر کدورت، دما، فسفات، نیترات، کلیفرم، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (BOD)، کل مواد جامد (TDS)، اکسیژن محلول (DO) و pH را براى محاسبه شاخص اصلی انتخاب کردند. در اين شاخص، براى منظور کردن میزان اثر هر پارامتر به هر یک از آن‌ها یک وزن یا ارزش عددی نسبت داده می‌شود که در جدول (۱) آمده است (Brown et al., 1970; Shamsaei et al., 2005).

شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت آمریکا (NSFWQI) براون و همکاران (Brown et al., 1970) با حمایت مؤسسه ملی بهداشت آمریکا، این شاخص کیفی کاهشی را بر اساس نظرسنجی از تعداد زیادی از افراد متخصص با تخصص‌هاى گوناگون در این زمینه ارائه نمودند که در حال حاضر یکی از شاخص‌هاى پرکاربرد جهت طبقه‌بندی کیفیت آب‌ها می‌باشد. ایشان در ابتدا حدود ۳۵ پارامتر آلودگی را مطرح کردند و سپس

جدول ۱. فاکتورهای وزنی مربوط به پارامترهای مورد استفاده در شاخص NSFQI
Table 1. Weighting factors related to the parameters used in the NSFQI index

پارامتر	اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی	اکسیژن محلول	فسفات کل	کلیفرم	کدورت	تغییرات دما	نیترات	کل مواد جامد	pH
Parameter	Biological oxygen demand	Dissolved oxygen	Total Phosphates	Coliform	Turbidity	Temperature changes	Nitrate	Total dissolved solids	pH
وزن	0.11	0.17	0.1	0.16	0.08	0.1	0.1	0.07	0.11
Weight	0.11	0.17	0.1	0.16	0.08	0.1	0.1	0.07	0.11

برای به‌دست آوردن زیر شاخص‌ها می‌توان از نمودارهای تهیه شده توسط مؤسسه بهداشت آمریکا (Kharake and Raut, 2021) استفاده کرد. کیفیت آب بر اساس مقدار این شاخص که از صفر تا صد متغیر است در جدول (۲) طبقه بندی شده است.

سپس با استفاده از رابطه زیر، شاخص NSFQWI محاسبه می‌گردد:

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (1)$$

که در این رابطه n تعداد پارامترها، I_i زیر شاخص پارامتر I_i و W_i ضریب وزنی پارامتر I_i می‌باشد.

جدول ۲. توصیف کیفی آب بر اساس شاخص NSFQWI

Table 2. Water quality description based on NSFQWI index

مورد استفاده Application	NSFWQI	کیفیت Quality
دارای حالت طبیعی، در صورت استفاده از آن جهت تأمین آب شرب نیاز به تصفیه ندارد، مناسب برای پرورش شیلات و گونه‌های حساس. When used for drinking water, no purification is necessary. It's also suitable for breeding fisheries and sensitive species.	91-100	عالی Excellent
در صورت استفاده از آن جهت تأمین آب شرب نیازمند تصفیه متداول است، مناسب برای پرورش ماهی و گونه‌های حساس آبی، مناسب برای مقاصد تفریحی چون شنا. If the water is intended for drinking, it must be regularly purified, while also being suitable for aquatic life and recreational activities such as swimming.	71-90	خوب Good
در صورت استفاده از آن جهت تأمین آب شرب نیازمند تصفیه پیشرفته است، مناسب برای پرورش شیلات و گونه‌های مقاوم آبی، مناسب برای آب شرب حیوانات اهلی. If the water will be used for drinking, it must undergo advanced purification and be suitable for raising fish and water-resistant species as well as domestic animals.	51-70	متوسط Medium
مناسب برای آبیاری اراضی کشاورزی. Suitable for irrigation of agricultural land.	26-50	ضعیف Poor
برای هیچ کدام از استفاده‌های مذکور مناسب نمی‌باشد و تنها توانایی حمایت تعداد محدودی از اشکال آبزیان وجود دارد. It is not suitable for any of the above-mentioned uses, and there is only the ability to support a limited number of aquatic forms.	0-25	خیلی ضعیف Very poor

روش است (Cude, 2001; Rahnama and Sayari, 2016).

رابطه کلی برای محاسبه شاخص OWQI به‌صورت

$$OWQI = \frac{n}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI_i^2}}} \quad (2)$$

زیر می‌باشد: که در آن n تعداد زیر شاخص‌ها و SI_i زیر شاخص پارامتر I_i می‌باشد که از جداول موجود در منابع پیشین استخراج گردید (Cude, 2001). جدول (۳) بیانگر توصیف آب بر اساس مقادیر عددی شاخص OWQI می‌باشد که بین صفر تا صد متغیر است.

شاخص کیفیت منابع آب ایران (IRWQI)

این شاخص بر اساس متداول‌ترین پارامترهای کیفیت منابع آب ایران و از طرف سازمان حفاظت محیط

شاخص کیفیت آب اورگان (OWQI)

شاخص کیفی OWQI برای اولین بار در ایالت اورگان آمریکا توسط یک گروه بررسی‌کننده‌ی مسائل کیفی محیط زیست در سال ۱۹۷۹ جهت ارزیابی شرایط و روند کیفی آب ارائه گردید. در این شاخص که به صورت کاهشی می‌باشد، هر یک از پارامترهای هشت‌گانه (دما، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، خاصیت اسیدی، نیتروژن، فسفر کل، کل جامدات محلول و کلیفرم مدفوعی) فاقد ضریب وزنی بوده و دارای اثر یکسانی در مقدار نهایی شاخص می‌باشند. سادگی و در دسترس بودن پارامترهای کیفی مورد نیاز (هشت پارامتر) و تعیین زیر شاخص‌ها با استفاده از نمودار و یا روابط تحلیلی از مزایای این

جدول ۳. توصیف کیفی آب بر اساس شاخص OWQI
Table 3. Water quality description based on OWQI index

0-60	61-79	80-84	85-89	90-100	مقدار شاخص Index quantity
خیلی ضعیف Very poor	ضعیف Poor	متوسط Medium	خوب Good	عالی Excellent	کیفیت آب Water quality

که در آن W_i وزن پارامتر نام (جدول ۴)، N تعداد پارامترها و I_i مقدار شاخص برای پارامتر نام می‌باشد. در نهایت با استفاده از مقدار شاخص IRWQI و کلاس‌بندی ارائه شده در جدول (۴) می‌توان کیفیت آب و یا پساب را ارزیابی نمود.

زیست ایران ارائه شده است (Aghajanloo et al., 2022). در این روش وزن نسبی پارامترهای فیزیکوشیمیایی مطابق جدول (۴) تعیین می‌شود. پس از تعیین وزن پارامترها، مقدار شاخص IRWQI با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Hashemi et al., 2011):

$$IRWQI = \left[\prod_{i=1}^N I_i^{W_i} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (3)$$

جدول ۴. وزن نسبی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و میکروبی در روش IRWQI (Hashemi et al., 2011)
Table 4. Relative weight of physicochemical and microbial parameters in IRWQI method (Hashemi et al., 2011)

FC	EC	سختی کل Total hardness	فسفات Phosphate	کدورت Turbidity	آمونیم Ammonium	نیترات Nitrate	pH	COD	BOD	%DO	پارامتر Parameter
0.140	0.096	0.059	0.087	0.062	0.090	0.108	0.051	0.093	0.117	0.097	وزن Weight
						مقدار شاخص عددی Index quantity					
رده‌بندی کیفی Qualitative classification											
خیلی بد Very bad						<15					
بد Bad						15-29.9					
به نسبت بد Relatively bad						30-44.9					
متوسط Medium						45-55					
به نسبت خوب Relatively good						55.1-70					
خوب Good						70.1-85					
بسیار خوب Very good						>85					

تغییر شاخص کیفیت آب نداشته است (Aslhashemi and Taghipour, 2010). pH در همه فصول در حد مناسب بوده و تغییر چندانی نداشته و در نتیجه نقش مهمی در تعیین شاخص کیفیت آب ندارد. میزان کل جامدات نیز در همه فصول بیش از ۵۰۰ mg/L بوده و مطابق استاندارد، حداقل مقدار زیرشاخص ۲۰ برای آن منظور می‌گردد و در نتیجه تغییرات آن نیز تأثیری بر

نتایج و بحث

بررسی میانگین پارامترهای کیفی به‌دست آمده از آزمایشات مربوطه توسط شرکت آب و فاضلاب شیراز (جدول ۵) نشان می‌دهد که در همه‌ی ماه‌ها غلظت اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی بیشتر از ۳۰ mg/L بوده و مطابق استاندارد، حداقل مقدار زیرشاخص ۲ برای آن منظور می‌گردد و در نتیجه تغییرات آن تأثیری بر

کاهش می‌یابد که از عوامل اصلی کاهش شاخص کیفیت آب در نیمه اول سال می‌باشد. به‌طور کلی روند تغییرات پارامترهای کیفی پساب به‌گونه‌ای است که مقدار شاخص‌های کیفیت آب در نیمه دوم سال بیشتر شده و نشان‌دهنده‌ی کیفیت بهتر پساب در فصول تر سال است.

تغییر شاخص کیفیت آب نداشته است. کدورت پساب به‌دلیل بارش‌های پراکنده و نیز تغییر الگوی مصرف مردم در فصل‌های مختلف، تغییرات زیادی داشته و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. در فصول بهار و تابستان شرایط محیط برای رشد میکروبیوم‌های پاتوژن انسانی مناسب بوده و تعداد کلیفرم‌های مدفوعی افزایش می‌یابد. درصد اکسیژن محلول اشباع در فصول گرم

جدول ۵. میانگین پارامترهای کیفی در پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شیراز طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸

Table 5. The average quality parameters in the effluent of the Shiraz treatment plant during the 2018-2019

TP (mg/L)	TKN (mg/L)	FC	DO (mg/L)	کدورت (NTU)	NO ₃ (mg/L)	TDS (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	ΔT (°C)	pH	BOD (mg/L)	ماه Month
4.70	48.00	864.50	3.00	6.35	17.50	934.40	4.10	20.40	7.35	38.75	فروردین Mar-Apr
5.40	51.70	864.50	3.00	4.80	16.25	941.90	5.70	22.25	7.25	37.95	اردیبهشت Apr-May
5.50	49.70	864.50	2.55	7.25	16.75	928.00	5.90	24.05	7.20	35.30	خرداد May-Jun
5.90	48.50	864.50	2.50	5.30	17.00	919.65	5.80	25.75	7.20	39.15	تیر Jun-Jul
7.50	48.00	864.50	2.20	4.60	17.00	943.15	5.55	25.90	7.40	37.00	مرداد Jul-Aug
6.50	51.70	864.50	2.40	5.25	12.50	948.00	6.75	25.90	7.55	38.55	شهریور Aug-Sep
7.10	53.10	377.90	2.60	7.45	12.00	934.25	7.40	24.65	7.50	36.30	مهر Sep-Oct
8.40	50.60	377.90	2.70	5.75	12.50	843.20	5.60	21.85	7.40	34.60	آبان Oct-Nov
8.60	52.90	377.90	3.25	4.60	14.15	834.05	6.05	20.05	7.35	34.70	آذر Nov-Dec
9.30	52.40	377.90	3.35	5.50	16.85	880.00	7.00	18.65	7.35	35.40	دی Dec-Jan
10.40	51.30	377.90	4.10	5.90	16.80	918.15	7.30	17.95	7.40	30.40	بهمن Jan-Feb
9.30	48.30	377.90	3.30	6.20	16.75	894.15	6.45	19.35	7.30	32.35	اسفند Feb-Mar

تفریحی، پرورش شیلات و شرب حیوانات اهلی مناسب نیست. بهرامی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای به ارزیابی کیفی پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شیراز برای مصارف مختلف پرداختند. نتایج نشان داد کیفیت پساب خروجی فقط بر اساس

مقادیر میانگین شاخص NSFQI در ماه‌های مختلف بین ۲۸/۷۳ تا ۳۱/۵۴ می‌باشد که در طبقه کیفیت ضعیف قرار می‌گیرد (جدول ۶ و شکل ۲). پساب با چنین کیفیتی برای آبیاری اراضی کشاورزی مناسب است. به بیان دیگر کیفیت این پساب برای مقاصد

استفاده کرد (Bahrami et al., 2023). با آبیاری گیاهان غیرمثمر و پارک‌های جنگلی اطراف شیراز و حتی قسمتی از فضای سبز شهری می‌توان فشار بر منابع آب را تا حد زیادی کاهش داد. از طرف دیگر، استمرار آبیاری با این پساب که حاوی مواد آلی و مغذی به نسبت زیادی است، افزایش نیترات خاک را سبب شده و امکان شستشو و انتقال آن به منابع آب سطحی و زیرزمینی وجود خواهد داشت.

همچنین بر اساس مقادیر OWQI ماهانه که در بازه ۴/۳۸ تا ۷/۹۵ قرار می‌گیرد کیفیت این پساب خیلی ضعیف است (جدول ۶ و شکل ۲) که مؤید نتایج حاصل از شاخص NSFQI و مطالعات پیشین است.

جدول ۶. مقادیر شاخص‌های NSFQI، OWQI و IRWQI پساب خروجی ایستگاه تصفیه فاضلاب شیراز

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
Month	Mar- Apr	Apr- May	May- Jun	Jun- Jul	Jul- Aug	Aug- Sep	Sep- Oct	Oct- Nov	Nov- Dec	Dec- Jan	Jan- Feb	Feb- Mar
NSFWQI	29.93	29.72	29.00	28.73	29.29	29.83	30.87	31.54	31.54	31.14	31.11	30.76
OWQI	4.38	5.33	5.29	5.04	4.93	5.46	5.92	6.08	6.69	7.03	7.95	7.08
IRWQI	11.4	12.2	13.0	10.6	12.9	12.0	13.2	15.4	14.1	13.0	14.3	13.9

این گیاهان می‌توانند در سیستم‌های تصفیه آب با استفاده از پساب نقش مؤثری ایفا کنند.

۴- گیاهان رطوبت‌دوست: مانند بعضی از گونه‌های گیاهان خزهای مانند پونه و خز که رطوبت‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند با آب پساب سازگاری داشته باشند.

۵- گیاهان دارویی: برخی از گیاهان دارویی مانند آویشن، نعناع، زیره سبز و گل گاوزبان می‌توانند با استفاده از آب پساب کشت شوند. این گیاهان علاوه بر آبیاری با کمترین نیاز به آبیاری تکمیلی، می‌توانند محصولات دارویی با کیفیت بالا تولید کنند.

۶- گیاهان زینتی: برخی از گیاهان زینتی مثل گل‌های باغی، گل‌های آپارتمانی و گیاهان سبز داخلی می‌توانند با پساب آبیاری شوند. این گیاهان معمولاً نسبت به کیفیت آب حساسیت کمتری دارند و ممکن است با استفاده از پساب تغذیه و رشد خوبی داشته باشند.

به طور کلی، احتمالاً استفاده از پساب در آبیاری کشاورزی و فضای سبز با کاهش آلودگی‌های میکروبی

استاندارد سازمان محیط زیست ایران برای اهداف کشاورزی مناسب است و از نظر سایر استانداردها قابلیت چنین استفاده‌ای را ندارد. این پساب را می‌توان برای آبیاری درختان میوه زینتی، محصولات علوفه‌ای، درختان و فضای سبز کنار جاده‌های خارج از شهر، محصولات زراعی، صنعتی و جنگلی و نیز شرب دام و طیور به کار برد. اما برای آبیاری فضای سبز شهری، پرورش ماهی، تخلیه به آب‌های سطحی (مانند دریاچه مهارلو در مجاورت تصفیه‌خانه) و نیز تغذیه آب زیرزمینی محدودیت‌هایی دارد، هر چند برخی از این محدودیت‌ها را می‌توان با ارتقاء کارکرد تصفیه‌خانه رفع نموده و پساب را برای این اهداف نیز

مقدار میانگین شاخص IRWQI در بازه مورد مطالعه بین ۱۰/۶ تا ۱۵/۴ است که پساب را در رده خیلی بد قرار می‌دهد. ترکیب این پساب با آب با کیفیت مناسب جهت استفاده در آبیاری محصولات کشاورزی منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب شیرین می‌گردد. به عنوان مثال می‌توان پساب را به صورت مستقیم یا پس از بهبود کیفیت، از طریق سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و آبیاری زیرسطحی استفاده نمود.

از انواع گیاهان قابل آبیاری با پساب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

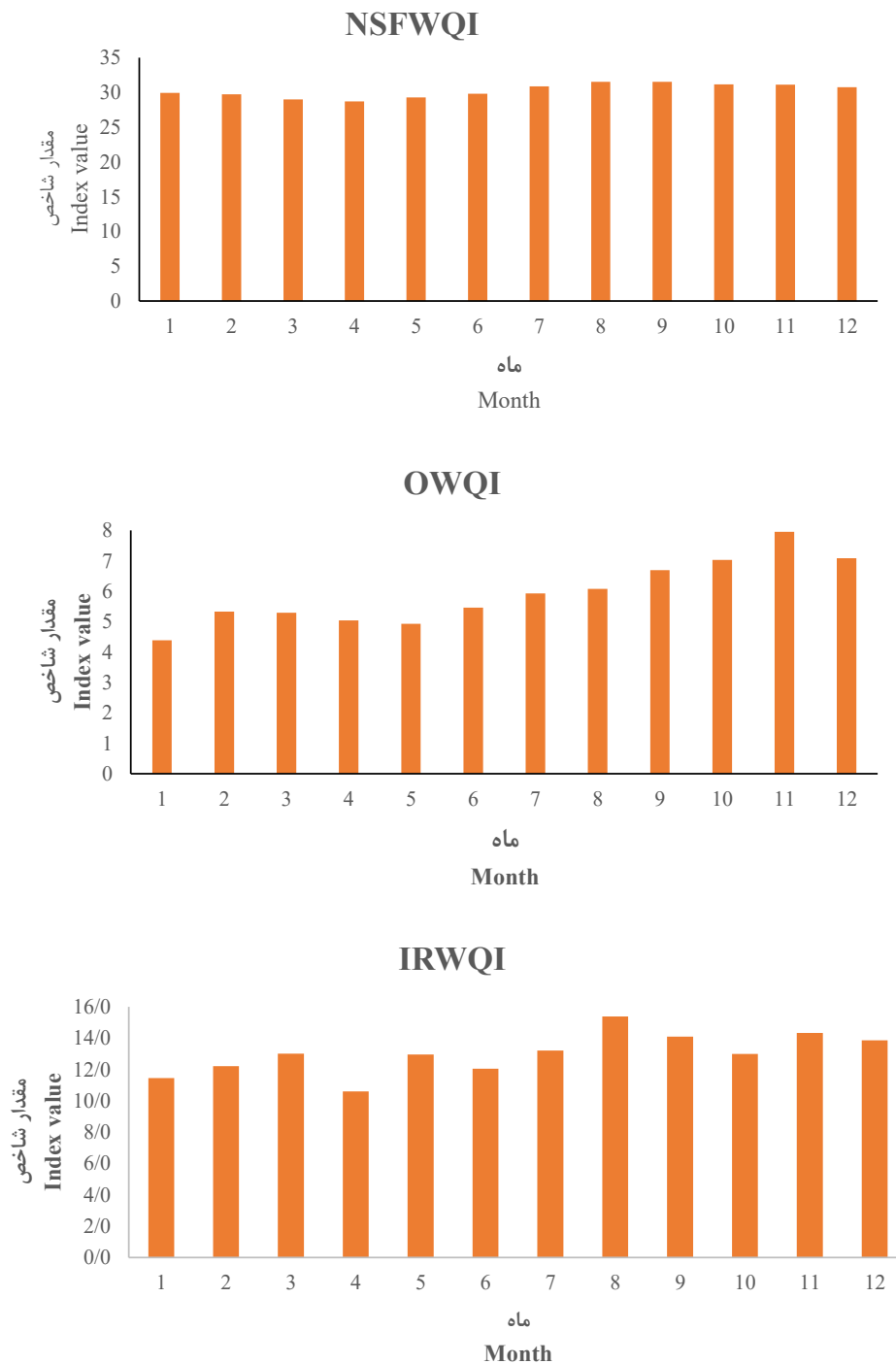
۱- گیاهان مقاوم به کیفیت پایین آب: برخی از گیاهان مانند بعضی از رقم‌های گندم، جو، گیاهان علوفه‌ای و برخی از درختان میوه.

۲- گیاهان شورزی: برخی از گیاهان مانند گونه‌هایی از گیاهان نمک‌دوست و گیاهانی مانند گلرنگ و حنا که مقاوم به شوری هستند.

۳- گیاهان تصفیه‌کننده آب: برخی از گیاهان مانند بامیه، شبدر، کنگر فرنگی و سوسن برای تصفیه آب و کاهش آلودگی‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کنترل شده و تحت نظارت سازمان‌های مربوطه طی دوره‌های مشخص می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد (Emamjomeh et al., 2017).

پساب و رعایت استانداردهای زیست محیطی کشور و با مطالعات جامع در خصوص ویژگی‌های خاک منطقه، نوع محصولات مورد کشت و ارزیابی غلظت دیگر آلاینده‌های موجود در فاضلاب صنعتی، تحت شرایط



شکل ۲. تغییرات شاخص‌های کیفیت آب پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شیراز در طول سال

Fig 2. Changes in the quality indices of Shiraz wastewater treatment plant during the year

sid.ir/paper/267749/en [In Persian]

- Aslhashemi, A. & Taghipour, H. (2010). Water Quality Index, *The Application of Chemistry in Environment*, 1(4), 1-5. SID. <https://sid.ir/paper/236291/en> [In Persian]
- Bahrami, A., Ahadi, F., Bahrami, M. & Aghamir, F. (2023). Qualitative assessment of Shiraz wastewater treatment plant effluent for different purposes, *Environmental Sciences*, 21(2), 29-48. doi: 10.52547/envs.2023.1151 [In Persian]
- Brown, R.M., McLelland, N.I., Deininger, R.A. & Tozer, R.G. (1970). A Water Quality Index – Do we dare? *Water & Sewage Works*. 339-343.
- Cude, C. G. (2001). Oregon water quality index a tool for evaluating water quality management effectiveness 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125-137.
- Ehsani, M. (2005). A vision on water resources situation, irrigation and agriculture production in Iran, ICID European Regional Conference.
- Einollahipeer, F., Ghaffari, M. & Dahmardeh Behrooz, R. (2020). Evaluation of Urban Wastewater with CWQI Model for agriculture and aquaculture reuse (case study in Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran), *Journal of Animal Environment*, 12(4), 581-592. [In Persian]
- Emamjomeh, M. M., Tari, K., Jamali, H. A., Karyab, H. & Hosseinkhani, M. (2017). Quality assessment of wastewater treatment plant effluents for discharge into the environment and reuse, *Journal of Mazandaran university of medical sciences* 26(145), 283-292. [In Persian]
- Ensink, J.H., van der Hoek, W., Mukhtar, M., Tahir, Z. & Amerasinghe, F.P. (2005). High risk of hookworm infection among wastewater farmers in Pakistan, *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 99(11), 809-818.

نتیجه گیری

مطالعه حاضر با استفاده از پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و با محاسبه شاخص‌های کیفیت آب IRWQI، NSFQI و OWQI به بررسی کیفیت پساب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر شیراز جهت مصارف کشاورزی پرداخته است. نتایج شاخص NSFQI نشان داد که پساب خروجی از کیفیت ضعیفی برخوردار است و صرفاً برای آبیاری اراضی کشاورزی مناسب می‌باشد. نتایج شاخص OWQI نیز بیانگر کیفیت خیلی ضعیف فاضلاب تصفیه شده شیراز است. یکی از اشکالات این شاخص این است که هر یک از پارامترهای هشت‌گانه فاقد ضریب وزنی بوده و اثر یکسانی در محاسبه شاخص نهایی دارند. با توجه به تأثیر یکسان پارامترها، کم بودن مقدار یک یا دو زیرشاخص منجر به افت شدید شاخص نهایی می‌شود. در نتیجه، در این روش پارامترهای با ارزش کم و پارامترهای با ارزش بالا به یک مقدار روی عدد نهایی شاخص تأثیر دارند. مقدار میانگین شاخص IRWQI نیز نشان‌دهنده‌ی رده خیلی بد پساب است. علاوه بر قابلیت استفاده این پساب در آبیاری گیاهان زینتی و غیرمثمر، می‌توان آن را با آب با کیفیت مناسب ترکیب نمود و در آبیاری محصولات کشاورزی استفاده کرد.

منابع

- Aghajanloo, K., Hajizadeh, E. & Ariaeezadeh, S. (2022). Evaluation of Karun River Water Quality Based on IRWQI and WAWQI Indicators in Molasani and Ahvaz Stations, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 367-380. doi: 10.22059/ijswr.2022.333148.669115 [In Persian]
- Al-Lahham, O., El Assi, N.M. & Fayyad, M. (2003). Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit, *Agricultural Water Management*, 61(1), 51-62.
- Anbir, L. & Noori, Z. (2018). Investigation of Effluent Quality of Ekbatan Wastewater Treatment Plant for Farm and Green Space Irrigation, *Journal of Land Management*, 6(1), 95-102. SID. <https://>

- (2012). Quality of Ardabil wastewater treatment plant effluent for reuse in agriculture, *Journal of Health*, 3(3), 73-80. [In Persian]
- Rahnama, S. & Sayari, N. (2015). Introduction of water quality indices for the classification and use of non-conventional waters in different sectors, Second National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, Isfahan. [In Persian]
- Rohani Shahraki, F., Mahdavi, R., & Rezaee, M. (2005). Effect of Irrigation with Wastewater on Certain Soil Physical and Chemical properties, *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 16(1), 23-29. [In Persian]
- Shamsaei, A., Oreei Zareh, S. & Sarang, A. (2005). The comparison of water indices and zoning quality in Karoon and Dez rivers, *Water and Wastewater*, 16(3 (55)), 39-48. [In Persian]
- Tchobanoglous, G., Burton, F. & Stensel, H.D. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse, *American Water Works Association Journal*, 95(5), 201.
- Faramarzi, M. (2010). Assessment of regional water endowments, crop water productivity, and implications for intra-country virtual water trade in Iran (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Hashemi, S.H., Farzampour, T., Ramezani, S. & Khoshro, Gh. (2011). Guideline for calculating the quality index of Iran's water resources, Iranian Department of Environment. [In Persian]
- Heidarpour, M., Mostafazadeh-Fard, B., Koupai, J.A. & Malekian, R. (2007). The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods, *Agricultural water management*, 90(1-2), 87-94.
- Jahed, B., Naseri, S., Khalili Naji, F. & Khatibi, M. Sh. (2013). Evaluating the quality of the wastewater treatment plant outflow in Shiraz for reuse in irrigation using the CWQI model, The 16th National Environmental Health Conference of Iran, Tabriz. [In Persian]
- Kharake, A. C. & Raut, V. S. (2021). An assessment of water quality index of Godavari river water in Nashik city, Maharashtra. *Applied Water Science*, 11(6), 101.
- Khosravi, B. & Dehzad, B. (2013). Managing the use of purified urban wastewater for agricultural purposes, The First National Conference of IRANs Environmental Research. [In Persian]
- Meftah Halaghi, M. (2011). Use of Different Water Quality Indexes for Purification of Water, Case Study; Atrak river, *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(2), 211-220. [In Persian]
- Mohammadi, P. (2008). A review on standards and experiences of using wastewaters effluents for irrigation. 1st ed. 2008, Tehran: Iranian national committee on irrigation and drainage 45. [In Persian]
- Nasseri, S., Sadeghi, T., Vaezi, F. & Naddafi, K.



Preservation and Restoration of Hamoun Wetland: a Joint Solution for Iran and Afghanistan in the Field of Facing the Climate Change Phenomenon

Mohammadreza Farzaneh^{1*}, Faezeh Banimostafaarab², Sahar Hussein Hamarashid³

1. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering and Pollution Monitoring, Research Center for Environment and Sustainable Development, RCESD, Department of Environment, Tehran, Iran.
2. MSc Graduated, Department of Financial Mathematics, Faculty of Statistics, Mathematics and Computer, Allameh Tabatabaai University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Faculty of applied science, Sulaimani Polytechnic University, Halabja, Iraq.

*Corresponding Author: farzaneh@rcesd.ac.ir & mrf.farzaneh.env@gmail.com

Keywords:

Climate change, Precipitation, Natural hazard, Temperature, wetland.

Extended Abstract

Introduction

Climate change is one of the most significant environmental challenges. It causes an increase in the average global temperature, widespread melting of snow and ice, rising sea levels, air pollution, poverty, etc. No region in the world is immune from this phenomenon. However, it is more severe in some countries like Iran and Afghanistan. Climate change in Iran has caused an increase in average temperature, a decrease in rainfall, and as a result, an increase in the occurrence of droughts and floods, a decrease in water resources, etc. Afghanistan is also one of the most vulnerable countries to climate change adverse effects, and the consequences of climate change include temperature increases, changes in precipitation patterns and extreme weather events, food insecurity, etc. This study examines the past climate conditions of Iran and Afghanistan on a macro-national scale and compares them with common solutions in this area.

Materials and methods

In this research, we use a qualitative research method and a review approach based on modeling at the international level. Extracting the results on a national scale has also been done through the data and information provided by the climate change knowledge portal in the field of temperature, precipitation, and natural hazards in Iran and Afghanistan.

Result and Discussion

In the first part, Iran and Afghanistan's historical problems in the field of the Hirmand River are examined. This dispute is 150 years old and the fact that Afghanistan is upstream of the Hirmand River has caused Iran to ignore its water rights. Then, past and future climatic conditions of Iran and Afghanistan are studied on a macro scale from the three perspectives of temperature, precipitation, and natural hazards. The monthly climatology of min-temperature, mean temperature, and max-temperature shows that

Received:

06 August 2023

Revised:

04 October 2023

Accepted:

04 October 2023

How to cite this article:

Farzaneh, M., & Banimostafaarab, F., & Hussein Hamarashid, S. (2024). Preservation and Restoration of Hamoun Wetland: a Joint Solution for Iran and Afghanistan in the Field of Facing the Climate Change Phenomenon. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 15-38. 10.22077/JDCR.2023.6658.1037



the max and min-temperatures in both countries were in July and January, respectively, and the mean temperature is also similar. The highest and lowest precipitation in Iran is in March and August, respectively. These values for Afghanistan correspond to March and September, respectively. The highest observed annual mean temperature in both countries in the last 120 years also belongs to recent years. The variability and trends of mean temperature and precipitation across the seasonal cycle of Iran and Afghanistan show that the highest mean temperature belongs to July and the highest amount of precipitation belongs to March. Iran and Afghanistan have also experienced the greatest changes in mean temperature distribution. Similarly, for precipitation, it is observed that the most change in precipitation distribution in Iran belongs to 1951-1980 and in Afghanistan to 1971-2000. Annual and monthly trends of mean temperature and mean precipitation have increased and decreased respectively. Finally, the projected mean temperature from 2000 to 2100 based on SSP scenarios, as well as the projected mean temperature anomaly, has been examined. The most deviations for both countries started in the 2010s and continue until 2100. The study of the projected annual SPEI drought index, illustrated based on five scenarios, indicates global warming intensification and a decrease in precipitation. The study of natural hazard statistics in Iran and Afghanistan in the last 40 years also shows that earthquakes, floods, storms, and landslides have mostly occurred. The occurrence of drought and flooding has also affected the most people.

In the second part, the three basic axes of adaptation, mitigation, and disaster risk reduction are introduced to deal with climate change. It is shown that preserving and restoring wetlands is the only strategy that pays attention to all three axes. Wetlands help adapt to climate change by improving water quality, supporting biodiversity, and producing organic matter and food. Also, they have the highest carbon absorption rate and act as a natural carbon sink, causing carbon sequestration and reducing greenhouse gas emissions. Wetlands also help reduce natural disasters and are resilient to floods, droughts, fires, storms, landslides, and erosion.

In the third part, the three basic axes of adaptation, mitigation, and disaster risk reduction are introduced to deal with climate change. It is shown that the strategy of preserving and restoring wetlands is the only strategy that pays attention to all three axes. Wetlands help adapt to climate change by improving water quality, supporting biodiversity, and producing organic matter and food. Also, they have the highest carbon absorption rate and act as a natural carbon sink, causing carbon sequestration and reducing greenhouse gas emissions. Wetlands also help reduce natural disasters and are resilient to floods, droughts, fires, storms, landslides, and erosion. Finally, solutions are explained.

Conclusion

In this research, the past and future climatic conditions of both countries were analyzed on a macro-national scale based on the reliable international database of the climate change knowledge portal from the three perspectives of temperature, precipitation, and natural hazards. The obtained results show the similarity of the patterns in Iran and Afghanistan, and the examination of the past and future trends of the climate situation indicates an increase in the mean temperature and a decrease in the mean precipitation, as well as the aggravation of these conditions and a greater threat to both countries in the future by natural hazards such as floods and earthquakes and drought. Finally, it is shown that the wetland is a triple strategy compatible with climate change in this context, and in the situation that both countries are affected by climate change, there is a serious focus on the preservation and restoration of the Hamoun Hirmand wetland, considering the role of ecosystem services in the entire watershed shared between the two countries is one of the significant and common solutions between the two countries. Finally, international mediators or facilitators can help bridge the gaps and provide impartial guidance to both countries.



حفظ و احیا تالاب هامون: راهکاری مشترک برای ایران و افغانستان در زمینه مواجهه با پدیده تغییر اقلیم

محمد رضا فرزانه^{۱*}، فائزه بنی مصطفی عرب^۲، سحر حسین همارشید^۳

۱. استادیار گروه مهندسی محیط زیست و پایش آلاینده‌ها پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران.
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه ریاضی مالی، دانشکده آمار، ریاضی و رایانه، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۳. استادیار دانشکده علوم کاربردی، دانشگاه پلی تکنیک سلیمانیه، حلبچه، عراق.

*نویسنده مسئول: farzaneh@rcesd.ac.ir & mrf.farzaneh.env@gmail.com

چکیده

واژه‌های کلیدی:

بارش، تالاب، تغییر اقلیم، دما، مخاطرات طبیعی.

کشورهای ایران و افغانستان در طول تاریخ با خطرهای اقلیمی مواجه بوده‌اند که خسارت‌های جانی، محیط‌زیستی و اقتصادی گسترده‌ای داشته است. در این پژوهش از یک چارچوب تحلیلی سه سطحی استفاده شد. در سطح اول، سابقه تاریخی دو کشور واکاوی گردید. در سطح دوم، شرایط بلندمدت اقلیمی گذشته‌ی آن‌ها در مقیاس کلان ملی و از منظر پارامترهای اقلیمی و مخاطرات طبیعی مقایسه و تصویرسازی شرایط محتمل دوره‌ی آتی تحت سناریوهای مختلف برای پارامترهای دما و بارندگی بر مبنای گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، ارائه گردید تا شباهت اقلیمی دو کشور از منظر شاخص‌های دوازده‌گانه مرتبط تبیین گردد. در سطح سوم، دلیل توجه به حفاظت و احیا تالاب به‌عنوان راهکار مشترک دو کشور در مواجهه با تغییر اقلیم تبیین گردید. نتایج نشان داد که بیشترین تغییر در توزیع میانگین دما در هر دو کشور در ۸۰ سال اخیر، متعلق به دوره‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰ است و دهه‌ی اخیر، گرم‌ترین دهه بوده است. همچنین بیشترین تغییر در توزیع بارندگی در ۸۰ سال اخیر در ایران و افغانستان به ترتیب متعلق به دوره‌های ۱۹۵۱-۱۹۸۰ و ۲۰۰۰-۱۹۷۱ است. همچنین آمار مخاطرات طبیعی ناشی از تغییر اقلیم در هر دو کشور نیز اهمیت ویژه سیل را نشان داد. نتایج بخش‌نهایی نشان داد که حفظ و احیای تالاب، یک استراتژی سه‌گانه سازگار با تغییر اقلیم است و در شرایطی که هر دو کشور متأثر از تغییر اقلیم هستند، تمرکز جدی بر حفظ و احیای تالاب هامون در زمینه تالاب یا تغییر اقلیم یا هر دو، از راهکارهای مهم برای حل مناقشه بین دو کشور است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۱۵

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۷/۱۲

مقدمه

انتشار گازهای گلخانه‌ای رو به افزایش است و دهه‌ی ۲۰۲۰-۲۰۱۱ به عنوان گرم‌ترین دهه شناخته شده است. دمای زمین نیز به نسبت اواخر دهه‌ی ۱۸۰۰ به میزان ۱.۱ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است. تصور می‌شود که تغییر اقلیم به معنای گرم‌تر شدن دما است اما فقط به این امر، محدود نمی‌شود. به طور کلی، در سیستم زمین، همه چیز به هم متصل است و تغییر در یک منطقه، ممکن است موجب تأثیر بر سایر مناطق نیز شود (United Nations (a), 2022). هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، این پدیده را به عنوان تغییرات شناسایی شده در وضعیت آب‌وهوا (به عنوان مثال، با استفاده از آزمون‌های آماری) از طریق تغییر در میانگین و/یا تغییرپذیری ویژگی‌های آن تعریف می‌کند که برای یک دوره‌ی طولانی و معمولاً چند دهه یا بیشتر ادامه دارد. تغییر اقلیم ممکن است به دلیل فرآیندهای داخلی طبیعی یا عوامل خارجی مانند نوسان چرخه‌های خورشیدی، فوران‌های آتشفشانی و تغییرات انسانی مداوم در ترکیب جو یا کاربری اراضی رخ دهد (IPCC (b), 2022).

اگرچه دانشمندان همچنان به بحث درباره‌ی مکانیسم‌های دقیق تغییر اقلیم ادامه می‌دهند، اما اجماع زیادی وجود دارد که تغییرات اخیر در اقلیم زمین، از جمله افزایش میانگین دمای جهانی هوا و اقیانوس‌ها، ذوب گسترده‌ی برف و یخ و بالا آمدن سطح آب‌های جهان، نتیجه‌ی فعالیت انسانی است (NEPA and UNEP, 2015). ریسک‌ها و هزینه‌های ناشی از تغییر اقلیم به تدریج قابل توجه‌تر می‌شوند. تغییرات اقلیمی به شدت با بسیاری از ریسک‌های موضوعات محیط‌زیستی (کیفیت آب، آلودگی هوا، مدیریت پسماند، جنگل‌زدایی و تخریب زمین و غیره) و موضوعات اجتماعی (تأمین انرژی، توسعه انسانی، فقر و نابرابری درآمد، امنیت ملی و غیره) مرتبط است و بدین معناست که تهدیدات تغییر اقلیم احتمالاً به تدریج بزرگ‌تر می‌شود، مگر اینکه اقدامات بیشتری انجام گردد (AON, 2018).

داده‌های اقلیمی مشاهده شده در دهه‌های اخیر، به

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

وضوح روند گرم شدن را در بسیاری از نقاط جهان نشان می‌دهد که منجر به طیف گسترده‌ای از اثرات اقلیمی می‌شود. در ایران نیز که کشوری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، ناهنجاری‌های اقلیمی قابل توجهی مشاهده شده است. ایران علاوه بر مشکلات مدیریتی، با مخاطرات طبیعی زیادی از جمله کاهش منابع آب تعداد قابل توجهی از دریاچه‌ها و رودخانه‌ها گرفته تا فرونشست زمین، سیل و خشکسالی نیز مواجه بوده است (Vaghefi et al., 2019). شدت تغییر اقلیم در میان کشورهای خاورمیانه و به طور ویژه، ایران بیشتر است و در دهه‌های آینده با افزایش میانگین دما و کاهش بارندگی مواجه خواهد شد. همچنین به دلیل افزایش شهرنشینی و تولید قابل توجه نفت و گاز با مجموع انتشار نزدیک به ۶۱۶۷۴۱ میلیون تن دی‌اکسید کربن، اولین کشور مسئول تغییرات اقلیمی در خاورمیانه و هفتمین کشور در جهان است. براساس گزارش‌های علمی اخیر، فراوانی بارش‌های شدید در ایران کاهش و پس از آن خطر خشکسالی در دوره‌های آینده افزایش می‌یابد که امنیت آب و غذا به ویژه برای مردمی که در شهرهای پرجمعیت ایران ساکن هستند را تهدید می‌کند (Mansouri Daneshvar et al., 2019). آب شیرین اغلب یک منبع کمیاب و گرانبها در ایران و خاورمیانه است. ترکیب یک منبع آب شیرین تحت فشار و رشد سریع جمعیت به طور قابل توجهی آسیب‌پذیری این منطقه را در برابر تغییر اقلیم آینده افزایش می‌دهد (Ghiami-Shamami et al., 2019). دریاچه ارومیه در دهه‌های اخیر، کوچک‌تر شده که بخشی از آن به دلیل تغییر اقلیم است که موجب کمبود آب می‌شود (Shadkam et al., 2016).

وقوع تغییر اقلیم در ایران به عنوان یک کشور در حال توسعه در مقایسه با اقتصادهای قدرتمند، منجر به بروز مسائل اجتماعی و اقتصادی شده است. مهم‌ترین پیامد تغییر اقلیم در ایران، افزایش فرین‌های جوی بوده که به طور کلی یا بازه زمانی-فضایی الگوهای آب‌وهوایی تغییر کرده یا وقوع آن‌ها بیشتر یا کمتر از میانگین بوده است (Akbari and Sayad, 2021). براساس تحقیقات و ارزیابی انجام شده در طول پروژه فعالیت فعال‌سازی تغییر اقلیم تحت چارچوب

طالبان، به طور قابل توجهی موجب افزایش ناامنی معیشتی و غذایی و در نتیجه افزایش کمک‌های بشردوستانه اضطراری شده است (Rosvold et al., 2021). خشکسالی شدید و سیل ناشی از تغییر اقلیم تأثیرات مختلفی در افغانستان داشته و به طور ویژه موجب ایجاد گرسنگی شدید شده است. تقریباً نیمی از جمعیت افغانستان تا می ۲۰۲۲ در ناامنی غذایی شدید قرار داشتند و زندگی یا معیشت آن‌ها در خطر فوری بوده است (Sayed and Sadat, 2022). حوادث اقلیمی مانند سیل، ریزش بهمن، بارش سنگین برف و غیره همراه با زمین‌لرزه‌های نادر، به طور متوسط، سالانه ۲۰۰ هزار نفر را در افغانستان تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب وارد شدن خسارت زیادی به جان، معیشت و مال افراد می‌شود (Cross, 2019).

مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر تغییر اقلیم در موضوعات متعدد در مناطق مختلف ایران صورت پذیرفته است که ابعاد موضوع تغییر اقلیم و اثرپذیری مؤلفه‌های مختلفی به‌ویژه مؤلفه‌های منابع آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم را بطور ویژه مورد بررسی قرار داده‌اند (Abdolhosseini and Farzaneh, 2014; Hadi et al., 2016; Nuri et al. 2014; Fakhri, et al. 2011; Fakhri et al. 2012; Zamani-Nuri et al. 2013; Farzaneh et al. 2014; Delghandi et al., 2023; Farzaneh and Banimostafaarab(a), 2023; Farzaneh and Banimostafaarab(b), 2023).

جهانشاهی و همکاران (Jahanshahi et al., 2022) با پیش‌نمایی مدل‌های تغییر اقلیم در محدوده‌ی تالاب هامون نشان دادند که احتمال افزایش دما و کاهش بارندگی در منطقه‌ی سیستان وجود دارد. شبیه‌سازی نشان داده است عمق آب بین ۱/۵ تا ۵ متر متغیر خواهد بود. ارزیابی علل خشکسالی تالاب بین‌المللی هامون با استفاده از شاخص‌های بارندگی، گردوغبار و خشکی توسط ذوالفقاری و خسروی (Zolfaghari and Khosravi, 2021) نشان دادند که میزان بارندگی فصل‌های بهار، پائیز و زمستان و بارش سالیانه دارای روند کاهشی بوده ولی معنادار نمی‌باشد. فراوانی شدت خشکی برای فصل‌های مختلف متفاوت بوده و فراوانی شدت خشکی سالیانه معادل ۳۳/۳ درصد

کنونسیون تغییر اقلیم سازمان ملل و با استفاده از سناریوهای پیشنهادی هیئت بین دولتی تغییر اقلیم، تخمین زده می‌شود که اگر غلظت دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰ دو برابر شود، میانگین دما در ایران بین ۴/۵-۱/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که موجب تغییرات قابل توجه در منابع آب، تقاضای انرژی، محصولات کشاورزی و مناطق ساحلی خواهد شد (Amiri and Eslamian, 2010). نتایج بررسی تأثیر تغییر اقلیم جهانی بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی برای سال ۲۰۲۰ براساس سناریوی استاندارد هیئت بین دولتی تغییر اقلیم توسط دو مدل گردش عمومی حاکی از افزایش ۳.۵ تا ۴.۵ درجه سانتی‌گرادی میانگین دمای سالانه ایران، کاهش ۷ تا ۱۴ درصدی بارندگی، طولانی‌تر شدن فصل رشد به دلیل افزایش تعداد روزهای بدون یخبندان، افزایش طول فصل خشک و همچنین افزایش تبخیر و تعرق سالانه به میزان ۱۸ تا ۳۰ درصد است (Koocheki et al., 2015). افغانستان در زمره‌ی کشورهای است که کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارد و آمارها در سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که ۰/۳ تن دی‌اکسیدکربن سرانه منتشر کرده است (Crippa et al., 2019). با این حال، گزارش‌ها حاکی از افزایش ۰.۶ درجه‌ی سانتی‌گرادی میانگین دمای سالانه افغانستان از سال ۱۹۶۰ هستند (UNFCCC, 2015). افغانستان به دلیل ترکیبی از عوامل سیاسی، جغرافیایی و اجتماعی، یکی از آسیب‌پذیرترین کشورها در برابر اثرات نامطلوب تغییر اقلیم در جهان است که براساس شاخص ابتکار سازگاری جهانی نوتردام ۲۰۲۰، از میان ۱۸۱ کشور در رتبه‌ی ۱۷۶ قرار دارد (WBG and ADB, 2021). تغییر اقلیم در افغانستان یک ریسک مبهم، آتی و بالقوه نیست بلکه یک تهدید بسیار واقعی و فعلی است که اثرات آن از قبل وجود داشته و میلیون‌ها کشاورز و دامدار در سراسر کشور، آن را احساس نمودند (WFP et al., 2016).

افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و رویدادهای شدید آب‌وهوایی مکرر از پیامدهای تغییر اقلیم در افغانستان است. در حال حاضر، این کشور، بدترین خشکسالی خود را در ۲۷ سال گذشته تجربه می‌کند که همراه با کووید-۱۹ و رکود اقتصادی پس از روی کار آمدن

مقیاس کلان ملی و مقایسه‌ی آن‌ها و همچنین ارائه‌ی راهکارهای مشترک شامل حفظ و احیای تالاب و نقش شخص ثالث به منظور حل اختلافات آبی را مورد توجه قرار داده است.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از یک چارچوب تحلیلی سه سطحی استفاده شده است تا ابعاد موضوع مهم حفظ و احیا تالاب هامون و راهکارهای مشترک ایران و افغانستان به‌ویژه در زمینه‌ی مواجهه با پدیده تغییر اقلیم تبیین گردد:

سطح اول: بررسی مشکلات تاریخی ایران و افغانستان در زمینه‌ی آب

در این سطح از تحلیل با تمرکز بر روش تحقیق کیفی و تحلیل محتوای اسناد مکتوب، شرایط تاریخی ایران و افغانستان در زمینه‌ی آب تبیین و اهمیت موضوع مناقشات آب، سابقه تاریخی دو کشور در زمینه‌ی تالاب هامون و حبابه تالاب هامون تحلیل گردید.

سطح دوم: بررسی وضعیت اقلیمی دوره‌ی گذشته و آتی ایران و افغانستان در مقیاس کلان تحت تأثیر تغییر اقلیم

در سطح دوم تحلیل شرایط تاریخی بلندمدت اقلیمی ایران و افغانستان با تمرکز بر ۱۲ شاخص مختلف تبیین گردید. شاخص‌های دوازده‌گانه مذکور شامل " (۱) اقلیم‌شناسی ماهانه حداقل دما، میانگین دما، حداکثر دما و بارندگی در سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰، (۲) میانگین دمای سالانه مشاهده‌شده در سال‌های ۱۹۰۱-۲۰۲۱، (۳) تغییر در توزیع میانگین دما، (۴) روندهای سالانه میانگین دما با توجه به اهمیت روند در هر دهه، (۵) روندهای ماهانه میانگین دما در ایران و افغانستان، (۶) میانگین دمای تصویرسازی شده (دوره‌ی مرجع ۱۹۹۵-۲۰۱۴)، مجموعه‌ی چند مدلی، (۷) انحراف از میانگین درازمدت میانگین دمای تصویرسازی شده (دوره‌ی مرجع ۱۹۹۵-۲۰۱۴)، مجموعه‌ی چند مدلی، (۸) تغییر در توزیع بارندگی، (۹) روندهای سالانه بارندگی با توجه به اهمیت روند در هر دهه، (۱۰) روندهای ماهانه بارندگی ایران و افغانستان، (۱۱) شاخص خشکسالی بارندگی استاندارد شده تصویرسازی‌شده، (دوره‌ی مرجع ۱۹۹۵-۲۰۱۴)،

برآورد گردید. نتایج نشان داد که تغییرات میزان گردوغبار و خشکی تالاب هامون به دلیل کاهش میزان بارش نبوده و خشک شدن آن بیشتر ناشی از سدسازی در بالادست حوضه و قطع آب ورودی به تالاب می‌باشد. کرمی و همکاران (Karami et al., 2022) با ارائه‌ی مدل مفهومی مدیریت مشارکتی تالاب هامون براساس رویکرد داده‌بنیان به این نتیجه رسیدند که تئوری اصلی طراحی مدل مشارکتی دارای شش مؤلفه بخش مدیریت جامع تالاب هامون، الزامات حقوقی- قانونی برای تأمین آب از طریق روابط دیپلماتیک با افغانستان، توانمندسازی ذی‌نفعان محلی از طریق جلسات آموزشی- مشورتی، ارتقا و اصلاح فرهنگ مدیران در تغییر نگرش به تخصیص آب برای فعالیت‌های اقتصادی مختلف و فرهنگ مردم محلی در اتخاذ روش‌های کشاورزی سازگار با اقلیم، کاهش وابستگی معیشت به مصرف آب تالاب از طریق توسعه صنعتی و تجاری و حفاظت پایدار محیط زیست تالابی است.

مشکلات تاریخی ایران و افغانستان در زمینه‌ی منابع آب سابقه تاریخی داشته و از حکمیت گلداسمیت در سال ۱۲۵۱ هجری شمسی آغاز شده است که منجر به تعیین مرز میان افغانستان و ایران بر روی شاخه اصلی رود هلمند شده است. سپس حکمیت مک ماهون در سال ۱۲۸۴ باعث تعیین مرز جدید میان دو کشور و تعیین یک سوم آب هلمند بعنوان حبابه ایران شده است. در سال ۱۳۱۵ پروتکل موقت باعث تقسیم آب هلمند از بند کمال خان تا لخشک بمدت یکسال بطور مساوی شده است. قرارداد سال ۱۳۱۷ هجری شمسی، کمیسیون دلتا سال ۱۳۳۰ هجری شمسی و قرارداد دائمی سال ۱۳۵۱ هجری شمسی از دیگر سوابق تاریخی مربوط به قراردادهای ایران و افغانستان در رابطه با حبابه هیرمند می‌باشد (Khalili and Hashemi, 2018).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تحقیقات و تحلیل‌های فوق، اکثراً منطقه‌ای و در خصوص موضوعات خاص بوده و در سطح کلان ملی و مقایسه‌ی دو کشور و تبیین راهکارهای مشترک نبوده است. لذا پژوهش حاضر مروری بر وضعیت اقلیمی گذشته ایران و افغانستان در

صفر خالص می‌رسد. این تغییرات اجتماعی-اقتصادی مشابه سناریوی اول، حرکت به سمت پایداری را تصور می‌کند. اما دمای هوا تا پایان قرن حدود ۱,۸ درجه‌ی سانتی‌گراد بیشتر می‌شود.

● **SSP 2-4.5**: سناریوی سوم یک سناریوی "میان راه" است. انتشار دی‌اکسید کربن در این سناریو قبل از شروع سقوط در اواسط قرن، حول سطوح فعلی معلق است، اما تا سال ۲۱۰۰ به صفر خالص نمی‌رسد. عوامل اجتماعی و اقتصادی بدون تغییر قابل توجه از روند تاریخی خود پیروی می‌کنند، پیشرفت به سمت پایداری کند است و توسعه و درآمد به طور نابرابر رشد می‌کند. در این سناریو، دما تا پایان قرن به میزان ۲,۷ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

● **SSP 3-7.0**: در این مسیر، انتشار و دما به طور پیوسته افزایش می‌یابد و انتشار دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ نسبت به سطح فعلی تقریباً دو برابر می‌شود و میانگین دما تا پایان قرن، به میزان ۳,۶ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

● **SSP 5-8.5**: این سناریو، شامل آینده‌ای است که به هر قیمتی باید از آن اجتناب کرد. سطح کنونی انتشار دی‌اکسید کربن تقریباً تا سال ۲۰۵۰ دو برابر می‌شود. اقتصاد جهانی به سرعت رشد می‌کند، اما این رشد با بهره‌برداری از سوخت‌های فسیلی و سبک زندگی پر انرژی تقویت می‌شود. میانگین دمای کره‌ی زمین در این سناریو، تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۴,۴ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر خواهد بود (Januta, 2021).

سطح سوم: تبیین راهکارها

سومین سطح از تحلیل با تمرکز بر تبیین راهکارها و با بهره‌گیری از روش مبتنی بر روش تحقیق کیفی صورت پذیرفت. با توجه به مستندات علمی ارائه شده در سطح اول و دوم اهمیت توجه به موضوع تالاب و تغییر اقلیم با واکاوی در منابع علمی بین المللی انجام گرفت. بر این اساس تحلیل محتوای اسناد مکتوب صورت پذیرفت. تحلیل محتوای مذکور نشان داد که توجه به موضوع تالاب-تغییر اقلیم دارای سه مولفه اساسی می‌باشد. این مولفه‌ها شامل (۱) نقش تالاب‌ها در سازگاری با تغییر اقلیم، (۲) نقش تالاب‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و (۳) نقش

مجموعه‌ی چند مدلی و (۱۲) میانگین وقوع سالانه مخاطرات طبیعی در ایران و افغانستان در سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰ است. داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای مؤلفه‌های ۱۲ گانه مذکور از واحد تحقیقات اقلیمی دانشگاه انگلیس شرقی تهیه شد. این واحد، پایگاه داده تاریخی شبکه‌ای را ارائه می‌دهد که از داده‌های مشاهداتی و داده‌های دما و بارندگی کنترل‌شده و همچنین اقلیم‌شناسی‌های تاریخی ماهانه و بلندمدت به دست آمده است. داده‌های مشاهداتی در این پایگاه داده، با وضوح مکانی، ۰,۵ × ۰,۵ درجه (۵۰ کیلومتر در ۵۰ کیلومتر) ارائه شده‌اند و میانگین، حداقل و حداکثر دما و بارندگی را نشان می‌دهد (Climate Change Knowledge Portal (c), 2022).

جهت تصویرسازی شرایط محتمل دوره‌ی آتی، تصویرسازی‌های مبتنی بر گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم (AR6) مد نظر قرار گرفت (IPCC, (a) 2021). تصویرسازی‌های دوره‌ی آتی بر مبنای مجموعه مدل‌های مورد تایید هیئت بین دولتی تغییر اقلیم و شامل ۵ سناریوی مسیر اجتماعی-اقتصادی مشترک صورت گرفته است، مبنای ریزمقیاس‌نمایی این داده‌ها براساس ضریب تغییرات ناشی از میان مدل‌های معرفی شده گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییر اقلیم است (جدول (۱)).

داده‌های مدل‌ها بر مبنای سناریوهای مختلف زیر تحلیل شد تا شرایط اقلیمی دوره‌ی آتی برای پارامترهای دما و بارندگی تا افق ۲۱۰۰ ترسیم گردد:

● **SSP1-1.9**: خوشبینانه‌ترین سناریوی هیئت بین دولتی تغییر اقلیم جهانی را توصیف می‌کند که در آن انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی در حدود سال ۲۰۵۰ به صفر خالص می‌رسد. جوامع با تغییر تمرکز از رشد اقتصادی به رفاه کلی، به شیوه‌های پایدارتر روی می‌آورند. سرمایه‌گذاری در آموزش و سلامت افزایش می‌یابد. نابرابری از بین می‌رود. آب‌وهوای شدید رایج‌تر است، اما جهان از بدترین اثرات تغییر اقلیم اجتناب کرده است.

● **SSP 1-2.6**: در بهترین سناریوی بعدی، انتشار جهانی دی‌اکسید کربن به شدت کاهش می‌یابد، اما نه به سرعت سناریوی اول و پس از سال ۲۰۵۰ به

جدول ۱. مدل‌های جفتی اقلیمی و زمینی در (IPCC,2021) CMIP6

Table1. Coupled Climate and Earth System Models in CMIP6

مدل‌ها Models	نام کامل کشور یا منطقه موسسه Institution Full Country or Region Name
TaiESM1.0	مرکز تحقیقات AS-RCEC برای تغییرات محیط‌زیستی، آکادمی سینیکا تایوان، چین AS-RCEC Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica Taiwan, China
AWI-CM-1-1-LR AWI-CM-1-1-MR AWI-ESM-1-1-LR	موسسه AWI آلفرد وگنر آلمان AWI Alfred Wegener Institute Germany
BCC-CSM2-MR	مرکز اقلیمی BCC پکن، چین BCC Beijing Climate Centre, China
BCC-ESM1	بی سی سی BCC
CAMS-CSM1-0	آکادمی علوم هواشناسی CAMS چین CAMS Chinese Academy of Meteorological Sciences China
FGOALS-f3-L	آکادمی علوم CAS چین CAS Chinese Academy of Sciences China
FGOALS-g3	کاس CAS
CanESM5 CanESM5-CanOE	مرکز کانادایی CCCMa برای مدل‌سازی و تحلیل اقلیمی کانادا CCCMa Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Canada
IITM-ESM	مرکز تحقیقات تغییر اقلیم CCCR-IITM، مؤسسه هواشناسی گرمسیری هند CCCR-IITM Centre for Climate Change Research, Indian Institute of Tropical Meteorology India
CMCC-CM2-SR5 CMCC-ESM2	مرکز اروپایی مدیترانه‌ای CMCC در مورد تغییر اقلیم، ایتالیا CMCC Centro EuroMediterraneo sui Cambiamenti Climatici Italy
CNRM-CM6-1 CNRM-CM6-1-HR	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی CNRM و مرکز تحقیقات و آموزش اروپا CERFACS پیشرفته در محاسبات علمی فرانسه CNRM Centre National de Recherches Météorologiques and CERFACS Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique France
CNRM-ESM2-1	CNRM و CERFACS CNRM and CERFACS
ACCESS-ESM1-5	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع CSIRO استرالیا CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Australia
ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS CSIRO و مرکز تعالی شورای Austr. Res علوم سیستم اقلیمی استرالیا CSIRO-ARCCSS CSIRO and Austr. Res. Council Centre of Excellence for Climate System Science Australia
E3SM 1.0 E3SM-1-1 E3SM-1-1-ECA	کنسرسیوم آزمایشگاه‌های ملی E3SM ایالات متحده آمریکا E3SM National Laboratories Consortium USA
EC-Earth3 EC-Earth3-LR	کنسرسیوم EC-Earth اروپا EC-Earth Consortium Europe

مدل‌ها Models	نام کامل کشور یا منطقه موسسه Institution Full Country or Region Name
EC-Earth3-CC	EC-Earth EC-Earth اولین مؤسسه اقیانوس‌شناسی و اجرای آزمایشی ملی
FIO-ESM-2-0	آزمایشگاه علوم و فناوری دریایی (کینگدائو) FIO-QNLM، چین FIO-QNLM First Institute of Oceanography and Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), China کنسرسیوم HAMMOZ سوئیس، آلمان، انگلستان، فنلاند
MPI-ESM-1-2-HAM	HAMMOZ Consortium Switzerland, Germany, UK, Finland
INM-CM4-8 INM-CM5-0	مؤسسه INM برای ریاضیات عددی، فدراسیون روسیه INM Institute for Numerical Mathematics Russian Federation
IPSL-CM6A-LR	مؤسسه IPSL پیر-سیمون لاپلاس فرانسه IPSL Institut PierreSimon Laplace France
IPSL-CM5A2-INCA	IPSL IPSL
KIOST-ESM	مؤسسه علوم و فناوری اقیانوس KIOST کره جنوبی KIOST Korea Institute of Ocean Science & Technology Republic of Korea
MIROC-ES2L MIROC-ES2H MIROC6 -HADGEM3 GC31-LL -HADGEM3 GC31-MM	کنسرسیوم R-CCS، NIES، AORI، MIROC JAMSTEC ژاپن MIROC Consortium JAMSTEC، AORI، NIES، R-CCS Japan اداره هواشناسی MOHC مرکز هادلی انگلستان MOHC Met Office Hadley Centre UK
UK-ESM1.0-LL	MOHC MOHC
MPI-ESM1-2-LR MPI-ESM1-2-HR	مؤسسه هواشناسی MPI-M ماکس پلانک آلمان MPI-M Max Planck Institute for Meteorology Germany
MRI-ESM-2.0	مؤسسه تحقیقات هواشناسی MRI ژاپن MRI Meteorological Research Institute Japan
GISS-E2-1-G GISS-E2-1-H GISS-E2.1-G-CC GISS-E2-2-G CESM2 CESM2-FV2 CESM2-WACCM -CESM2 WACCM-FV2	مؤسسه مطالعات فضایی گدارد NASA-GISS ایالات متحده آمریکا NASA-GISS Goddard Institute for Space Studies USA مرکز ملی تحقیقات جوی NCAR ایالات متحده آمریکا NCAR National Center for Atmospheric Research USA
NorCPM1 NorESM1-F NorESM2-LM NorESM2-MM	کنسرسیوم مدل‌سازی اقلیمی NCC NorESM نروژ NCC NorESM Climate Modelling Consortium Norway NCC NCC
KACE-1-0-G	مؤسسه ملی علوم هواشناسی NIMS-KMA، کره، اداره هواشناسی کره جنوبی NIMS-KMA National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration Republic of Korea

مدل‌ها Models	نام کامل کشور یا منطقه موسسه Institution Full Country or Region Name
GFDL-CM4	اداره ملی اقیانوسی و جوی NOAA-GFDL، آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیک ایالات متحده آمریکا NOAA-GFDL National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA
GFDL-ESM4	NOAA-GFDL NOAA-GFDL
NESM3	دانشگاه علوم و فناوری اطلاعات NUIST Nanjing چین NUIST Nanjing University of Information Science and Technology China
SAM0-UNICON	دانشگاه ملی SNU سئول کره جنوبی SNU Seoul National University Republic of Korea
CIESM	گروه علوم سیستم زمینی THU چین THU Department of Earth System Science China
MCM-UA-1-0	دانشگاه ارویزنا، ایالات متحده آمریکا University of Arizona USA

منبع: (IPCC (a), 2021)

حل‌نشده‌ی دیگر در آب‌های فرامرزی وجود دارد که نیازمند دیدگاه‌ها و چارچوب‌های قانونی جدید برای بهبود امنیت و صلح در تمام نقاط جهان در اطراف آب‌های فرامرزی است (Najafi and Vatanfada, 2013). اختلافات موجود ایران و افغانستان در زمینه‌ی آب رودخانه‌ی هیرمند که از افغانستان سرچشمه گرفته و به تالاب هامون ایران، سرآزیر می‌شود، قدمتی ۱۵۰ ساله دارد (Solaymani et al., 2020) که از سال ۱۸۷۲ یکی از منابع پایدار مشاجره بین این دو کشور بوده است (Khalili and Hashemi, 2018). دشت سیستان با مساحت حدود ۱۵۰۰ کیلومترمربع یکی از دشت‌های نسبتاً بزرگ واقع در پایین‌دست رودخانه‌ی هیرمند است که بین مرز دو کشور ایران و افغانستان قرار گرفته است. وجود رودخانه‌ی هیرمند و دریاچه‌ی هامون با توجه به میزان پایین بارش و بالای تبخیر در سیستان، عامل اصلی تمدن، شهرنشینی و اقتصاد پویا در منطقه‌ی دشت سیستان است (Enayatmeh-ri and Abassi Ashlaghi, 2020). مجموعه‌ای از عوامل جغرافیایی و انسانی و همچنین شرایط بین‌المللی و منطقه‌ای، موجب ظهور اختلافات آبی شده است (Khalili and Hashemi, 2018). به طور کلی بالادست بودن افغانستان نسبت به رودخانه‌ی هیرمند موجب بهره‌برداری بیشتر و نادیده گرفتن حقابه ایران

تالاب‌ها در کاهش ریسک حوادث طبیعی می‌باشد که راهکارهای مرتبط با هر یک از مؤلفه‌ها بر مبنای تجارب بین‌المللی تبیین گردید.

نتایج و بحث

بررسی مشکلات تاریخی ایران و افغانستان در زمینه‌ی آب

آب منبع حیات و منبع تنش، نادر و غیر قابل جایگزینی است و منجر به چالش‌های ژئوپلیتیکی بزرگ می‌شود. آگاهی در مورد تغییر اقلیم و تنش‌ها و حکمرانی مناسب این "طلای آبی" ممکن است عاملی برای صلح باشد (United Nations (b), 2023). آب‌های فرامرزی، سفره‌های زیرزمینی، دریاچه‌ها و حوضه‌های رودخانه‌ای مشترک بین دو یا چند کشور مشترک هستند و حدود ۶۰ درصد از جریان آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهند. ۱۵۳ کشور حداقل در یکی از ۲۸۶ حوضه‌ی رودخانه و دریاچه‌ی فرامرزی و ۵۹۲ سیستم سفره‌های زیرزمینی فرامرزی، قلمرو دارند (UN Water, 2022). پس از توسعه‌ی سرزمین‌ها و مرزهای جدید، چالش‌های استفاده از آب‌های فرامرزی آغاز شده است. امروزه بسیاری از کشورهای جهان قراردادهای دو یا چند جانبه در مورد منابع آبی مشترک و فرامرزی دارند و پتانسیل تنش در حال تبدیل شدن به پتانسیل همکاری است. همچنین بسیاری از چالش‌های

۲۶ درجه‌ی سانتی‌گراد مشخص می‌شود. دوره‌ی بارانی در بیشتر نقاط کشور از آبان تا اردیبهشت است و پس از آن دوره‌ی خشک بین اردیبهشت تا مهر با بارش نادر است. میانگین بارندگی سالانه‌ی کشور حدود ۲۴۰ میلی‌متر و بارندگی حداکثر در دشت‌های دریای خزر، دامنه‌های البرز و زاگرس به ترتیب با بیش از ۱۸۰۰ و ۴۸۰ میلی‌متر است. ایران دارای تنوع اقلیمی با سه نوع اقلیم است: (۱) اقلیم خشک و نیمه‌خشک: بخش وسیعی از اراضی داخلی و مرز جنوبی ایران دارای این اقلیم است. (۲) اقلیم کوهستانی که خود به دو دسته اقلیم سرد و معتدل کوهستانی تقسیم می‌شود (۳) اقلیم خزری: ناحیه باریک و کوچک بین دریای خزر و کمر بند کوه البرز که دارای بارندگی سالانه ۶۰۰-۲۰۰۰ میلی‌متر است (Climate Change Knowledge Portal (a), 2022).

کشور افغانستان نیز دارای آب‌وهوای خشک قاره‌ای با تغییرات دما و بارندگی قابل توجه بین فصول است. دما در این کشور براساس ارتفاع، بسیار متفاوت است، به طوری که مناطق کوهستانی، دمای زیر صفر را به طور سالانه و مناطق خشک جنوبی دمای بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد را به طور مداوم تجربه می‌کنند. بارندگی براساس توپوگرافی به طور قابل توجهی متفاوت است، به طوری که منطقه خشک جنوب غربی معمولاً کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر و رشته کوه شمال شرقی بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر بارندگی را در سال تجربه می‌کنند. شرایط در افغانستان همچنین تعامل درون سالانه پیچیده‌ای با پدیده‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ، به ویژه نوسانات جنوبی ال‌نینو و دو قطبی اقیانوس هند دارد که مورد دوم با شرایط خشکسالی در افغانستان همراه است (Climate Change Knowledge Portal (b), 2022).

در ادامه، وضعیت اقلیمی دوره‌ی گذشته ایران و افغانستان در مقیاس کلان ملی براساس دما، بارندگی و مخاطرات طبیعی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در شکل (۱) اقلیم‌شناسی ماهانه حداقل دما، میانگین دما، حداکثر دما و بارندگی در ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های راست و چپ) در سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر دما در

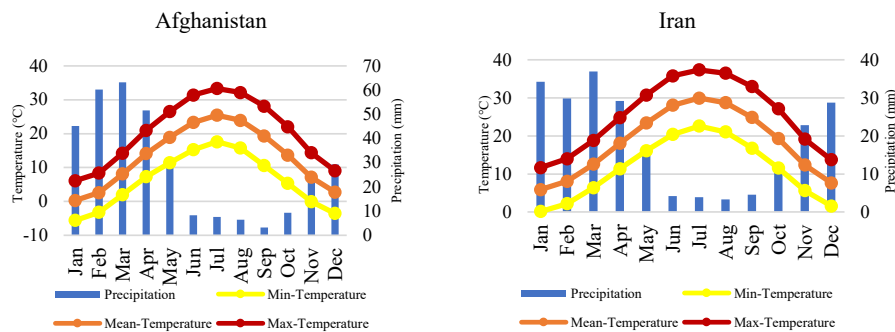
شده است. حفر کانال‌های انحرافی، ایجاد سدهای مختلف، گزارش‌های نادرست از میزان و حجم آب ذخیره‌شده در افغانستان و عدم همکاری صحیح و به موقع در نشست‌های مشترک از جمله مواردی است که دولت‌مردان افغانستان از گذشته تاکنون در خصوص تقسیم آب رودخانه هیرمند انجام داده‌اند (Moosaza-deh and Abbaszadeh, 2016).

همچنین از زمان جدایی دو کشور، حکمیت در مورد آب و حقابه دو کشور از رودخانه هیرمند مورد بررسی قرار گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به حکمیت گلداسمیت در سال ۱۸۷۲، مک ماهون در سال ۱۹۰۵ و کمیسیون دلتا در سال ۱۹۵۱ اشاره نمود. توافقاتی مانند توافقنامه ۱۳۱۶ بین دو کشور نیز برای استفاده از آب رودخانه‌ی هیرمند صورت گرفت که با وجود امضا از جانب مقامات هر دو کشور، بنا به دلایلی، عملیاتی نشد (Khalaj Amirhosseini and Najafi, 2011). سرانجام در سال ۱۳۵۱ معاهده‌ی دلتا در خصوص نحوه‌ی استفاده از آب رودخانه منعقد شد که در حال حاضر نیز مورد استناد و پذیرش هر دو کشور قرار دارد (Farsha Saeed and Khodarahmi, 2016). بر طبق این معاهده، سهم آب ایران از رود هیرمند، ۲۶ متر مکعب در ثانیه (معادل ۸۲۰ میلیون متر مکعب در سال) است که البته به هیچ وجه نیازهای آبی سیستان را تأمین نمی‌کند (Moosazadeh and Ab-baszadeh, 2016). به طور کلی، موانع متعددی مانع از حل مناقشه آبی ایران و افغانستان شده که کمبود منابع آب در منطقه، یکی از مسائل مهم در این زمینه است که با تغییر اقلیم و خشکسالی‌های مکرر شرایط بدتر شده است (Shokri, 2023). همچنین با روی کار آمدن طالبان در سال ۲۰۲۱، این تنش‌ها افزایش یافته است.

بررسی وضعیت اقلیمی دوره گذشته‌ی و آتی ایران و افغانستان در مقیاس کلان تحت تأثیر تغییر اقلیم
آب‌وهوای کشور ایران به جز نواحی ساحلی شمالی و بخش‌هایی از غرب ایران، عمدتاً خشک و نیمه‌خشک با تابستان گرم و خشک و زمستان بسیار سرد به ویژه در مناطق داخلی است. به غیر از نواحی ساحلی، دما در ایران با دامنه‌ی نسبتاً بزرگ سالانه، حدود ۲۲ تا

حداقل دما با حدود ۶- درجه‌ی سانتی‌گراد متعلق به ماه ژانویه (دی و بهمن) بوده است. میانگین بیشترین و کمترین دما نیز به ترتیب به ماه‌های ژوئیه (تیر و مرداد) با حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و ژانویه (دی و بهمن) با صفر درجه‌ی سانتی‌گراد تعلق دارد. همچنین بیشترین و کمترین میزان بارندگی هم به ترتیب متعلق به ماه‌های مارس (اسفند و فروردین) با حدود ۶۳ میلی‌متر و سپتامبر (شهریور و مهر) با حدود ۳ میلی‌متر است. به طور کلی این شکل نشان می‌دهد که هر دو کشور از منظر دما و بارندگی، شرایط کلان مشابهی دارند.

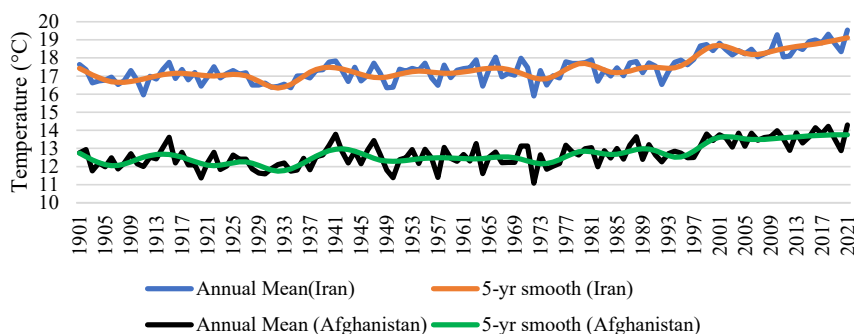
ایران متعلق به ماه ژوئیه (تیر و مرداد) با حدود ۳۷ درجه‌ی سانتی‌گراد و حداقل دما با صفر درجه‌ی سانتی‌گراد متعلق به ماه ژانویه (دی و بهمن) بوده است. میانگین بیشترین و کمترین دما نیز به ترتیب به ماه‌های ژوئیه (تیر و مرداد) با ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و ژانویه (دی و بهمن) با ۶ درجه‌ی سانتی‌گراد تعلق دارد. همچنین بیشترین و کمترین میزان بارندگی هم به ترتیب متعلق به ماه‌های مارس (اسفند و فروردین) با حدود ۳۷ میلی‌متر و آگوست (مرداد و شهریور) با حدود ۳ میلی‌متر است. به طور مشابه ملاحظه می‌شود که حداکثر دما در افغانستان متعلق به ماه ژوئیه (تیر و مرداد) با حدود ۳۴ درجه‌ی سانتی‌گراد



شکل ۱. اقلیم‌شناسی ماهانه حداقل دما، میانگین دما، حداکثر دما و بارندگی در سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰
 Fig 1. Monthly Climatology of Average Minimum Surface Air Temperature, Average Mean Surface Air Temperature, Average Maximum Surface Air Temperature & Precipitation 1991-2020

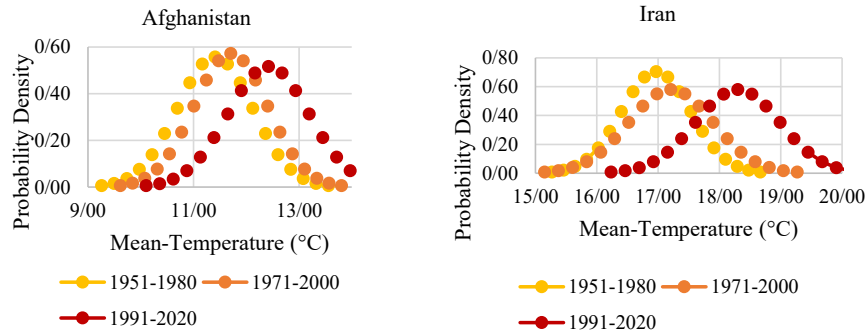
آخر (حدود ۱۴,۲ درجه‌ی سانتی‌گراد) و کمترین نیز به سال ۱۹۷۱ (حدود ۱۱,۲ درجه‌ی سانتی‌گراد) تعلق دارد. روند ۵ ساله نیز حاکی از افزایش دما در هر دو کشور است. به طور کلی در این شکل نیز، شرایط متوسط و همچنین نوسانات دما در هر دو کشور، از الگوی مشابهی پیروی می‌کند.

در شکل (۲) میانگین دمای سالانه مشاهده‌شده در ایران و افغانستان در ۱۲۰ سال اخیر نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین میانگین دما در ایران متعلق به سال‌های اخیر (حدود ۱۹,۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) و کمترین آن متعلق به سال‌های ۱۹۷۱ و ۱۹۱۱ (۱۶ درجه‌ی سانتی‌گراد) بوده است. همچنین بیشترین میانگین دما در افغانستان نیز به سال‌های



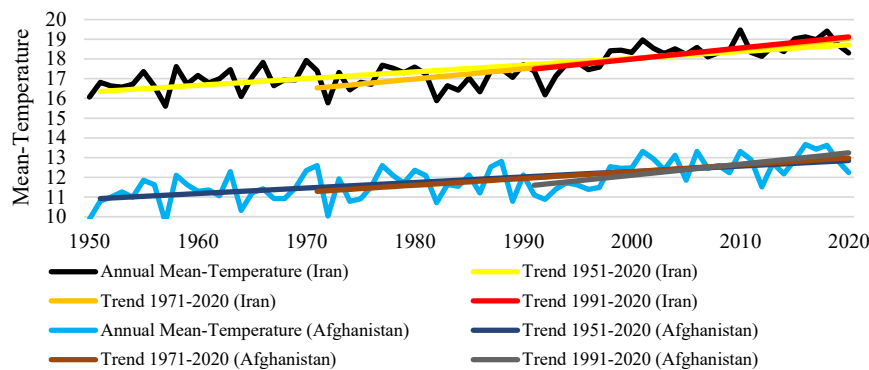
شکل ۲. میانگین دمای سالانه مشاهده‌شده در سال‌های ۱۹۰۱-۲۰۲۱
 Fig2. Observed Annual Average Mean Surface Air Temperature for 1901-2021

در شکل (۴) روندهای سالانه میانگین دمای ایران و افغانستان در ۸۰ سال اخیر با توجه به اهمیت هر روند در هر دهه نشان داده شده است. که روندهای ۸۰ سال اخیر (۱۹۵۱-۲۰۲۰)، ۵۰ سال اخیر (۱۹۹۱-۲۰۲۰) و ۳۰ سال اخیر (۲۰۲۰-۱۹۹۱) با یکدیگر مقایسه شده‌اند و ملاحظه می‌شود که میانگین دما در هر دو کشور روند رو به افزایش داشته است.



شکل ۳. تغییر در توزیع میانگین دما: ۱۹۵۱-۲۰۲۰

Fig3. Change in Distribution of Average Mean Surface Air Temperature; 1951-2020



شکل ۴. روندهای سالانه میانگین دما با توجه به اهمیت روند در هر دهه: ۱۹۵۱-۲۰۲۰

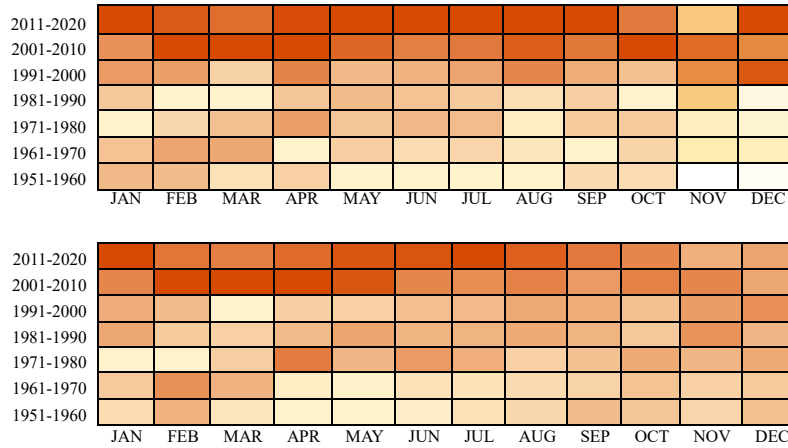
Fig4. Average Mean Surface Air Temperature Annual Trends with Significance of Trend per Decade; 1951-2020

در شکل (۷) انحراف از میانگین درازمدت میانگین دمای تصویرسازی شده ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های بالا و پایین) تا سال ۲۱۰۰ (از ۱/۵-درجه‌ی سانتی‌گراد تا ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد) براساس مجموعه‌ی چند مدلی و دهه‌های زمانی نشان داده شده است و دوره‌ی مرجع برابر با ۱۹۹۵-۲۰۱۴ می‌باشد. همان‌گونه که به وضوح مشاهده می‌شود بیشترین میزان انحراف در هر دو کشور در ۸۰ سال اخیر از دهه‌ی ۲۰۱۱-۲۰۲۰ آغاز شده و تا دهه‌ی ۲۰۹۱-۲۱۰۰ ادامه خواهد یافت.

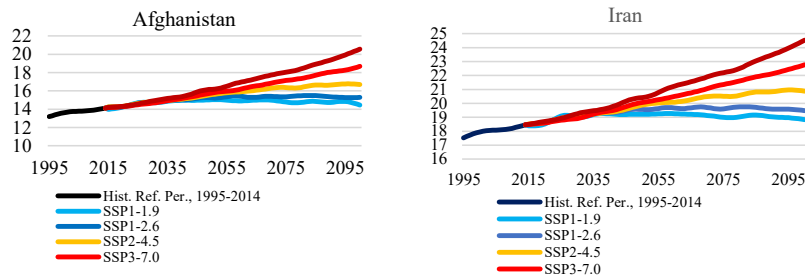
شکل (۳) شامل تغییر در توزیع میانگین دما در ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های راست و چپ) در ۸۰ سال اخیر را نشان می‌دهد که به سه بازه‌ی زمانی (۱۹۵۱-۱۹۸۰)، (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و (۱۹۹۱-۲۰۲۰) تقسیم شده که دوره‌های ۳۰ ساله هستند. ملاحظه می‌شود که بیشترین تغییر در توزیع میانگین دما در هر دو کشور متعلق به بازه‌ی زمانی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ است.

شکل (۵) روندهای ماهانه میانگین دمای ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های بالا و پایین) را در ۸۰ سال اخیر نشان داده است که ملاحظه می‌شود دو دهه‌ی اخیر در هر دو کشور، گرم‌ترین دهه‌ها بوده است و روند افزایشی وجود داشته است:

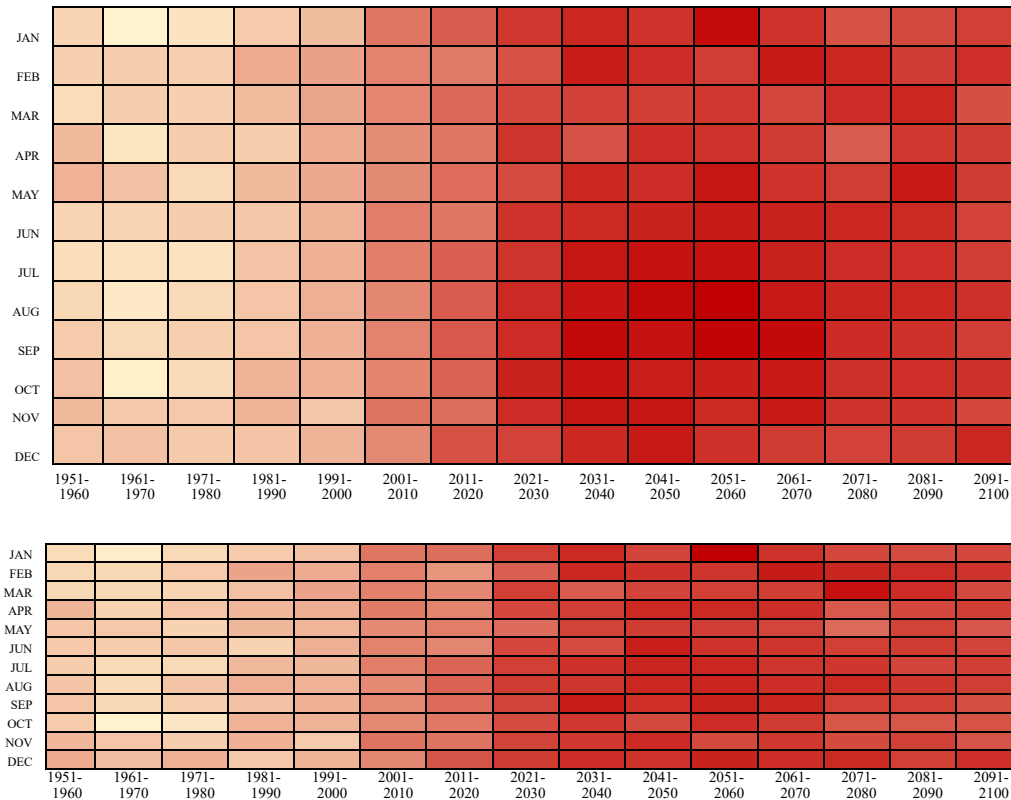
در شکل (۶) میانگین دمای تصویرسازی شده ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های راست و چپ) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ و براساس مجموعه‌ی چند مدلی شامل ۵ سناریوی مسیر اجتماعی-اقتصادی مشترک به همراه دوره مرجع سی ساله ۱۹۹۵-۲۰۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۵. روندهای ماهانه میانگین دما در ایران و افغانستان؛ ۱۹۵۱-۲۰۲۰
Fig5. Average Mean Surface Air Temperature Monthly Trends;1951-2020

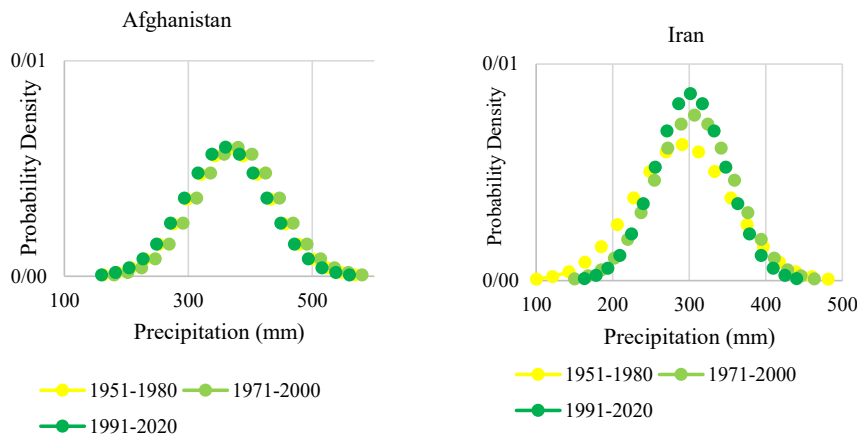


شکل ۶. میانگین دمای تصویرسازی شده (دوره مرجع ۲۰۱۴-۱۹۹۵)، مجموعه چند مدلی
Fig6. Projected Average Mean Surface Air Temperature (Ref. Period:1995-2014), Multi-Model Ensemble



شکل ۷. انحراف از میانگین دراز مدت میانگین دمای تصویرسازی شده (دوره مرجع ۲۰۱۴-۱۹۹۵)، مجموعه چند مدلی
Fig7. Projected Average Mean Surface Air Temperature Anomaly (Ref. Period:1995-2014), Multi-Model Ensemble

شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر در توزیع بارندگی در ایران به بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰-۱۹۵۱ و در افغانستان به بازه‌ی زمانی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ تعلق دارد.



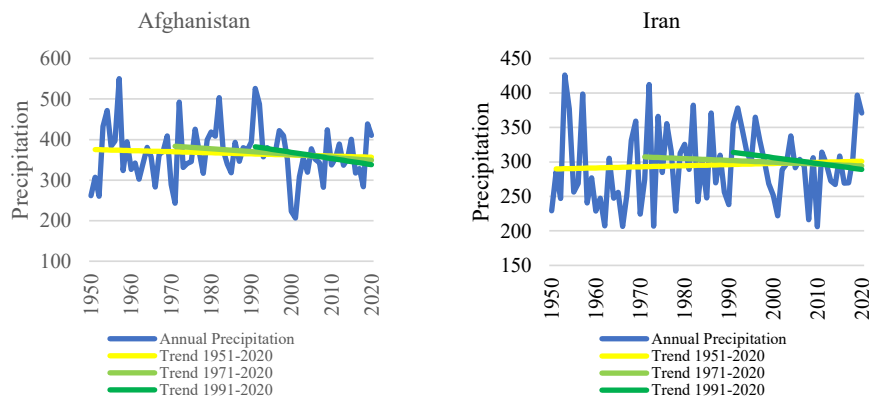
شکل ۸. تغییر در توزیع بارندگی؛ ۱۹۵۱-۲۰۲۰

Fig8. Change in Distribution of Precipitation; 1951-2020

زمانی ۸۰ سال، ۵۰ سال و ۳۰ سال تقسیم شده و نتایج به دست آمده حاکی از وجود روند کاهشی هستند.

شکل (۸) تغییر در توزیع بارندگی در ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های راست و چپ) در ۸۰ سال اخیر را نشان می‌دهد که به سه بازه‌ی زمانی سی ساله (۱۹۵۱-۱۹۸۰)، (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و (۱۹۹۱-۲۰۲۰) تقسیم

در شکل (۹) روندهای سالانه بارندگی ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های بالا و پایین) در ۸۰ سال اخیر با توجه به اهمیت هر روند در هر دهه، به بازه‌های



شکل ۹. روندهای سالانه بارندگی با توجه به اهمیت روند در هر دهه؛ ۱۹۵۱-۲۰۲۰

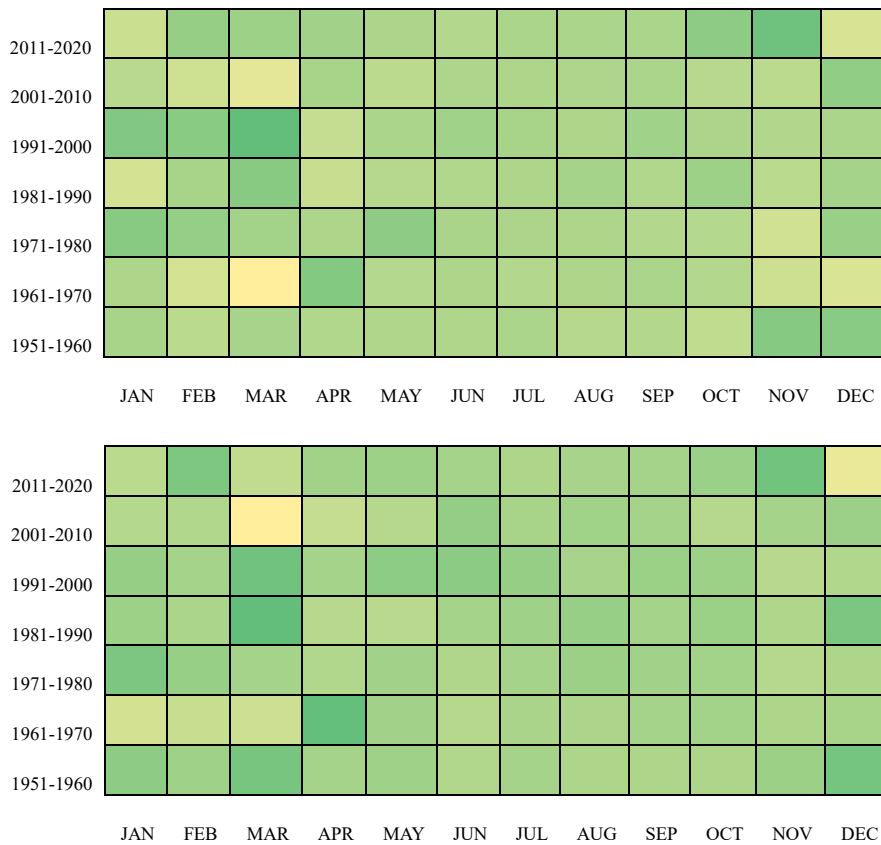
Fig9. Precipitation Annual Trends with Significance of Trend per Decade; 1951-2020

نشان داده است. به طور کلی این سناریوها، حاکی از تشدید گرمایش جهانی و کاهش روند بارندگی تا افق ۲۱۰۰ هستند.

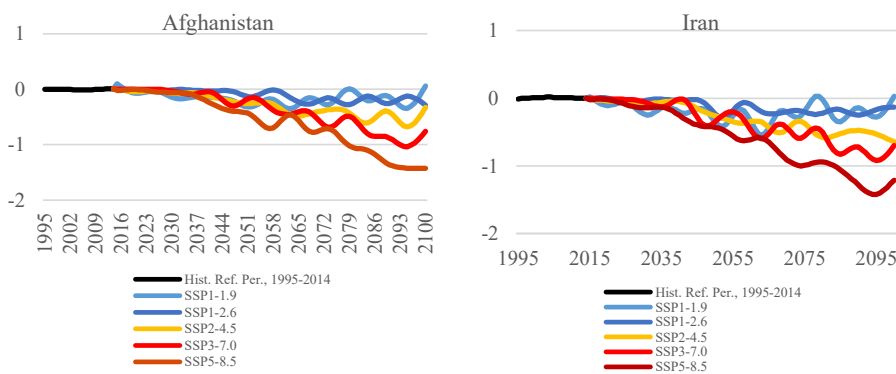
کشور ایران در زمره‌ی ۱۰ کشور حادثه‌خیز جهان قرار دارد و تغییر اقلیم نیز به نوبه خود موجب تشدید مخاطرات طبیعی می‌شود. وقوع خشکسالی در سال ۱۹۹۹ و سیل در سال ۲۰۱۹ در ایران به ترتیب با تحت تأثیر قرار دادن بیش از ۵۰ میلیون نفر و حدود ۵۰ میلیون نفر، حوادثی با بیشترین تأثیر را بر افراد

در شکل (۱۰) روندهای ماهانه بارندگی ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های بالا و پایین) در ۸۰ سال اخیر نشان داده شده است که به وضوح ملاحظه می‌شود که در دهه‌ی اخیر در هر دو کشور، یکی از بیشترین میزان بارندگی‌ها رخ داده است.

شکل (۱۱) شاخص خشکسالی شاخص بارندگی استاندارد شده تصویرسازی شده ایران و افغانستان (به ترتیب شکل‌های راست و چپ) با دوره مرجع ۱۹۹۵-۲۰۱۴ براساس پنج سناریوی شرح داده شده در بالا



شکل ۱۰. روندهای ماهانه بارندگی ایران و افغانستان؛ ۱۹۵۱-۲۰۲۰
Fig10. Precipitation Monthly Trends; 1951-2020



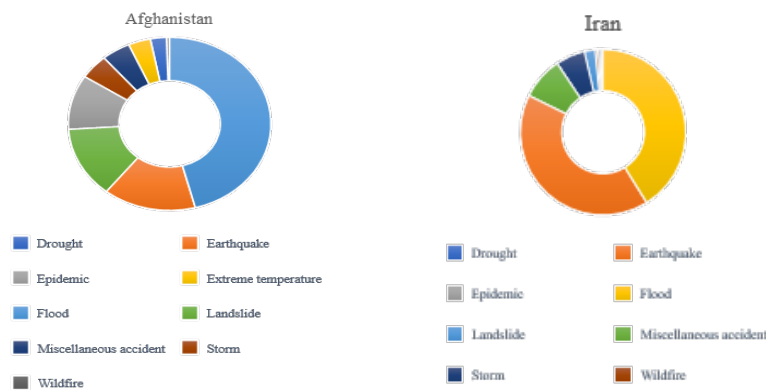
شکل ۱۱. شاخص خشکسالی شاخص بارندگی استاندارد شده تصویرسازی شده، (دوره مرجع ۱۹۹۵-۲۰۱۴)، مجموعه چند مدلی
Fig11. Projected Annual SPEI Drought Index (Ref. Period: 1995-2014), Multi-Model Ensemble

مخاطرات در هر دو کشور می‌توان به زلزله، سیل، رانش زمین، طوفان، آتش‌سوزی جنگل و خشکسالی اشاره کرد که بیشترین آمار وقوع متعلق به زلزله، سیل، طوفان و رانش زمین است.

تبیین راهکارها

برای مقابله با تغییر اقلیم سه استراتژی اساسی سازگاری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش ریسک حوادث طبیعی وجود دارد. سازگاری با

نشان می‌دهند (Climate Change Knowledge Portal) نشان می‌دهند (a), 2022). همچنین بیشترین تأثیر حوادث طبیعی در افغانستان به وقوع خشکسالی در سال ۲۰۱۸ و تحت تأثیر قرار دادن بیش از ۱۳ میلیون نفر، تعلق دارد (Climate Change Knowledge Portal (b), 2022). میانگین وقوع سالانه مخاطرات طبیعی در ۴۰ سال اخیر در ایران و افغانستان در شکل (۱۲) (به ترتیب شکل‌های راست و چپ) نشان داده شده است که از مهم‌ترین



شکل ۱۲. میانگین وقوع سالانه مخاطرات طبیعی در ایران و افغانستان در سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰
Fig12. Average Annual Natural Hazard Occurrence in Iran and Afghanistan for 1980-2020

از بارندگی و پساب شهری، نقش مهمی را ایفا کنند (Australian Government, 2016; Davis, 2001).

ب) حمایت از تنوع زیستی: تالاب‌ها، مخازن غنی از تنوع زیستی هستند. ۴۰ درصد از گونه‌های گیاهی و جانوری جهان در تالاب‌ها زندگی یا تولید مثل می‌کنند. به عنوان مثال دیواره‌ی مرجانی بزرگ استرالیا از ۱۵۰۰ گونه ماهی و حدود ۸۰۰۰ نرم‌تن پشتیبانی می‌کند و بیش از ۳۰۰۰ گونه ماهی در حوضه‌ی آمازون وجود دارند. در مجموع حدود ۱۰۰۰۰۰ گونه مختلف جانوری فقط از تالاب‌های آب شیرین جهان شناسایی شده‌اند (Ramsar, 2011; WWD (b), 2020). اهمیت تنوع زیستی تالاب‌ها در موارد زیر خلاصه می‌شود:

- پوشش گیاهی باتلاق، آلاینده‌ها را فیلتر می‌کند و آب را قابل شرب می‌سازد
- معیشت یک میلیارد نفر را تأمین و به تغذیه دنیا کمک می‌کند
- پوده‌زارها، ۳۰ درصد کربن زمین را ذخیره می‌کنند
- دریاچه‌ها و رودخانه‌ها به تأمین غذا و دارو می‌پردازند
- حرا و صخره‌های مرجانی در زمان طوفان و سونامی، از جوامع ساحلی محافظت می‌کنند
- تالاب‌ها سالانه ۴۷ تریلیون دلار، خدمات اکوسیستمی ارائه می‌دهند که بیشتر از جنگل‌ها، بیابان‌ها یا علفزارها است (WWD (b), 2020).
- پ) تولید مواد آلی و غذایی و منبع معیشت افراد: برخی از انواع تالاب‌ها به ویژه تالاب‌های مردابی از پرتولیدترین اکوسیستم‌های جهان هستند و حدود ۳,۵

تغییرات اقلیمی به عنوان فرآیند تعدیل برای کاهش یا اجتناب از اثرات منفی تغییر اقلیم تعریف می‌شود و از اهمیت حیاتی برخوردار است (Van Valkengoed and Steg, 2019). کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هم به محدود کردن تغییر اقلیم از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یا حذف این گازها از جو زمین اشاره دارد (IPCC(a), 2021). به طور کلی سازگاری و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دو روی یک سکه هستند که کاهش انتشار به علل تغییر اقلیم و سازگاری به اثرات آن می‌پردازد (Rose, 2014). کاهش ریسک حوادث طبیعی نیز به عنوان مفهوم و عمل کاهش ریسک حوادث طبیعی از طریق تلاش‌های سیستماتیک برای تجزیه و تحلیل و مدیریت عوامل علت حوادث با کاهش قرار گرفتن در معرض ریسک مخاطرات، کاهش آسیب‌پذیری افراد و دارایی‌ها، مدیریت عاقلانه زمین و محیط‌زیست و بهبود آمادگی برای اثرات نامطلوب تعریف می‌شود (Van Niekerk, 2011). کارکرد و نقش تالاب‌ها در سازگاری با تغییر اقلیم، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش ریسک حوادث طبیعی عبارت است از:

نقش تالاب‌ها در سازگاری با تغییر اقلیم

الف) بهبود کیفیت آب: زمانی که تالاب‌ها، سالم باشند، تنوع گیاهی و جانوری فراوانی دارند و می‌توانند به عنوان سیستم‌های تصفیه عمل کنند و رسوبات، مواد مغذی و آلاینده‌ها را از آب حذف نمایند. تالاب‌های سالم می‌توانند به حذف باکتری‌های مضر کمک کنند و در مدیریت آب‌های سطحی حاصل

برابر اکوسیستم‌های خشکی، تولید دارند. همچنین بیش از یک میلیارد نفر در جهان، برای امرار معاش به تالاب‌ها وابسته هستند. تالاب‌ها میزبان طیف گسترده‌ای از مشاغل مانند پرورش برنج، صید ماهی، گردشگری و تفریح، حمل و نقل، تأمین آب و معیشت سنتی مبتنی بر محصول تالاب هستند که نشان می‌دهد برای زندگی و شکوفایی انسان، ضروری می‌باشند (WWD (a), 2016).

نقش تالاب‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

محرک اصلی تغییر اقلیم در جهان، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسید کربن است. تالاب‌ها بالاترین نرخ جذب کربن را در زمین نسبت به اکوسیستم‌های دیگر دارند و به عنوان سینک طبیعی کربن عمل می‌کنند. ترسیب کربن به حذف دی‌اکسید کربن از جو و انتقال و تجمع آن در مخزن خاک به عنوان ماده‌ی آلی خاک اشاره دارد و یکی از خدمات اکوسیستم نظارتی اصلی است که تالاب‌ها ارائه می‌دهند. نرخ‌های ترسیب کربن در میان انواع مختلف تالاب، تنوع زیادی دارد که بالاترین مقدار برای مرداب‌های آب شیرین است. ترسیب کربن در تالاب‌های آب شیرین یعنی رسوب‌گذاری از ارتفاعات و تولید مواد آلی در محل و پوده‌زارها صورت می‌گیرد که کربن در آن فقط از طریق تولید گیاه در محل ترسیب می‌شود. کربن در تالاب به پنج شکل اصلی کربن آلی ذرات، کربن آلی محلول، کربن زیست‌توده گیاهی، کربن زیست‌توده میکروبی و محصولات نهایی گازی مانند متان و دی‌اکسید کربن وجود دارد. عوامل مؤثر بر ترسیب کربن در تالاب‌ها شامل در دسترس بودن بستر، دما و اکسیژن، سناریوهای تغییر جهانی و انتقال کربن به بیرون می‌شود (Lolu et al., 2020).

نقش تالاب‌ها در کاهش ریسک حوادث طبیعی

تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن، موجب افزایش فراوانی و شدت حوادث طبیعی در سراسر جهان شده‌اند. تالاب‌ها می‌توانند به کاهش اثرات این حوادث طبیعی کمک کنند و در برابر مخاطرات طبیعی زیر، تاب‌آوری داشته باشند:

● سیل: تالاب‌ها می‌توانند اثرات سیل را با جذب آب اضافی و حفظ آن یا بازگرداندن آن به سطح آب

کاهش دهند.

● خشکسالی: تالاب‌ها می‌توانند آب را ذخیره کنند که یک حائل را در برابر خشکسالی فراهم می‌کند.

● آتش‌سوزی: تالاب‌ها می‌توانند به عنوان یک مانع طبیعی در برابر گسترش آتش‌سوزی عمل کنند.

● طوفان‌ها: تالاب‌ها با کاهش سرعت طوفان‌ها، کاهش ارتفاع و نیروی امواج، کند کردن باده‌ها و تثبیت خاک و رسوبات، اثرات طوفان را به حداقل می‌رسانند.

● زمین‌لغزش و فرسایش: حفظ و بازسازی پوشش گیاهی آبریز، ساحلی و درون رودخانه‌ای می‌تواند خاک را تثبیت و آب‌های سیل را کند سازد و خطر فرسایش حوضه‌ها و سواحل رودخانه‌ها را کاهش دهد.

وقتی که تالاب‌ها به طور مناسب، مدیریت شوند، می‌توانند موجب تاب‌آوری جوامع برای آماده‌سازی در برابر حوادث طبیعی و مقابله با آن‌ها شوند که این امر از سه طریق آماده‌سازی/پیشگیری، مقابله و تجدید قوا صورت می‌گیرد (Australian Government, 2016).

همچنین میانجی‌گران یا تسهیل‌گران بین‌المللی می‌توانند در پر کردن شکاف‌ها و ارائه‌ی جهت‌گیری بی‌طرفانه برای نتیجه‌گیری کمک نمایند. سازمان‌های بین‌المللی باید با متخصصان موضوع فنی در هر دو طرف برای بررسی موضوع و توسعه‌ی راهکارهای قابل اجرا، همکاری کنند. سیاستمداران عاقل و آینده‌نگر باید منافع مشترک هر ملت را بشناسند و هر دو طرف باید در سطح تصمیم‌گیران دولتی و از طریق سازمان‌های دانشگاهی، علمی و مدنی با یکدیگر ارتباط برقرار کنند (Shokri, 2023).

خدمات مناسب توسط یک شخص ثالث و به دنبال آن یک رویه دآوری در نهایت ممکن است بر نیاز به اجرای کامل معاهده دلتا تأکید نماید. فقدان ظرفیت انسانی و فنی و اهمیت رودخانه برای افغانستان، ممکن است سبب انصراف آن‌ها از تعامل با ایران گردد. با این حال، توسعه‌ی یک بسته‌ی اشتراک منافع، به ویژه برای جوامعی که در سرتاسر حوضه زندگی می‌کنند، همکاری بر سر این رودخانه را تسهیل و در عین حال در غلبه بر مشکل اعتماد، به هر دو طرف کمک می‌کند (Faizee, 2022).

و آب‌وهوایی خود، متأثر از این پدیده و آسیب‌ها و خسارت‌های ناشی از آن می‌باشند و نمی‌توان تغییر اقلیم را محدود به کشور یا منطقه‌ی خاصی دانست. کشورهای ایران و افغانستان نیز از جمله مناطقی هستند که تحت تأثیر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند. در ایران میزان دما نسبت به ۷۰ سال گذشته، ۱.۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و در افغانستان ۱.۸ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است. در این پژوهش وضعیت اقلیمی دوره‌ی گذشته و آتی ایران و افغانستان در مقیاس کلان ملی و بر مبنای داده‌ها و گزارش‌های بین‌المللی معتبر، از سه منظر دما، بارندگی و مخاطرات طبیعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

کشور ایران، دارای تنوع اقلیمی است و سه اقلیم خشک و نیمه‌خشک، کوهستانی و خزری در آن وجود دارد. افغانستان نیز دارای آب‌وهوای خشک قاره‌ای با تغییرات دما و بارندگی قابل توجه بین فصول است. بررسی توزیع میانگین دما در ایران و افغانستان در ۸۰ سال اخیر براساس سه بازه‌ی زمانی سی ساله (۱۹۵۱-۱۹۸۰)، (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و (۱۹۹۱-۲۰۲۰) نشان داد که بیشترین تغییر در توزیع میانگین دما در هر دو کشور به سی سال اخیر و بازه‌ی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ تعلق دارد. به علاوه تغییر در شدت حوادث برحسب حداکثر دمای روزانه هر دو کشور حاکی از این است که بیشترین تغییر متعلق به ۲۰ سال اخیر و اوج روند افزایشی متعلق به ۱۰ سال اخیر بوده است. بررسی روندهای ماهانه میانگین دما در هر دهه در هر دو کشور و مقایسه‌ی آن‌ها در ۸۰ سال، ۵۰ سال و ۳۰ سال اخیر نیز نشان‌دهنده‌ی روند رو به افزایش است. موارد فوق، حاکی از گرم‌تر شدن معنی‌دار دما در این دو کشور و افزایش روند در این زمینه است. نتایج بررسی میزان بارندگی نیز نشان می‌دهد که بازه‌ی زمانی ۱۹۵۱-۱۹۸۰ در ایران و بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ در افغانستان شامل بیشترین تغییر در توزیع بارندگی بوده است. همچنین تغییر در شدت حادثه براساس بارندگی در هر دو کشور، نشان‌دهنده‌ی پراکندگی تغییرات در تمامی دهه‌ها است. با این حال به طور کلی می‌توان بیان نمود که روند بارندگی، رو به

به طور کلی می‌توان جمع‌بندی نمود که هر دو کشور ایران و افغانستان می‌بایست به بحث مشکلات آبی در منطقه به عنوان بستر و ظرفیتی برای همکاری‌های آبی و تقویت دیپلماسی و نه تشدید مناقشات و چالش‌های روزافزون توجه داشته باشند و عملاً باید در مسیر دیپلماسی گام بردارند. بحث تالاب در این مسیر، یک راهکار حیاتی است. لذا نگاه علمی به بحث تالاب و کارکردهای آن براساس شرایط گذشته و براساس آینده‌پژوهی و تهدید هر دو کشور توسط تغییر اقلیم و خسارات وارده بر آن‌ها از جمله حوادثی مانند سیل و زلزله که در شرایط آتی، تشدید نیز خواهد شد، صورت گرفت و پیشنهاد می‌شود که نه تنها در ایران بلکه در افغانستان نیز تمرکز ویژه‌ای بر حفظ و احیای تالاب صورت گیرد. همچنین متولیان در عرصه‌ی بین‌المللی در زمینه تالاب یا تغییر اقلیم یا هر دو، یکی از بهترین گزینه‌ها هستند که از نظر فنی، مؤسسه یا گزینه سومی را مطرح نمایند که چالش‌های کمتری وجود داشته باشد و پتانسیل مناقشه تبدیل به پتانسیل همکاری شود. در این زمینه می‌توان مؤسسات مرتبط با تغییر اقلیم از جمله صندوق اقلیم سبز^۱، صندوق جهانی حیات وحش^۲، شبکه اقدامات اقلیمی^۳ و غیره را نام برد.

نتیجه‌گیری

مشکلات تاریخی ایران و افغانستان در زمینه‌ی منابع آب سابقه‌ی تاریخی داشته و از حکمیت گلداسمیت در سال ۱۲۵۱ هجری شمسی آغاز شده و پس از مناقشات گسترده به قرارداد دائمی سال ۱۳۵۱ هجری شمسی در رابطه با حقایق هیرمند ختم شده است و کماکان این مناقشات بین دو کشور بدلیل عدم تخصیص حقایق ادامه دارد.

اگرچه میزان آسیب‌پذیری کشورهای مختلف از عوامل متأثر از تغییر اقلیم، متفاوت است ولی اطلاعات منتشره در خصوص وقوع حوادث طبیعی و اقلیمی در تمام نقاط جهان نشان می‌دهد که همه‌ی کشورها بسته به ساختار اقتصادی و نیز شرایط جغرافیایی

1. Green Climate Fund (GCF)
2. World Wildlife Fund (WWF)
3. Climate Action Network (CAN)

و عدم تخصیص حقایق هیرمند، بلکه به‌عنوان بستری جهت همکاری دو کشور برای مشارکت‌های آبی در مسیر دیپلماسی آب و بعنوان جایگزینی برای رویکرد مبتنی بر مناقشات آبی بین دو کشور مطرح نمود. جلب توجه بین‌المللی به ضرورت حفظ دریاچه هامون به عنوان تالاب ثبت‌شده جهانی و ضرورت پایبندی طرف افغانستانی به رهاسازی حقایق، علاوه بر حقایق به ایران، بسیار واجد اهمیت بوده و فعالیت‌های دیپلماسی همراه با ارائه موارد فنی می‌بایست در اولویت اول دستگاه‌های ذی‌ربط قرار گیرد. در نهایت میانجی‌گران یا تسهیل‌گران بین‌المللی می‌توانند در از بین رفتن شکاف‌ها و ارائه جهت‌گیری بی‌طرفانه به طرفین کمک کنند.

منابع

- Abdolhosseini, M. and Farzaneh, M. R. (2014). Investigation of internal uncertainty sources of change factor method in downscaling of climatic parameters of future period. *Intl J Agric Crop Sci*, 7(12), 941-949.
- Akbari, M. and Sayad, V. (2021). Analysis of climate change studies in Iran, *Physical Geography Research Quarterly*, 53(1), 37-74. doi: 10.22059/jphgr.2021.301111.1007528 [In Persian].
- Amiri, M. J. and Eslamian, S. S. (2010). Investigation of climate change in Iran, *Journal of Environmental Science and Technology*, 3(4), 208-216.
- AON. (2018). Climate Change Challenges: Climate change scenarios and their impact on funding risk and asset allocation. AON.
- Australian Government. (2016). Wetlands and water quality. Australian Government Department of Environment.
- Climate Change Knowledge Portal (a). (2022). *Afghanistan*. Retrieved from Climate Change Knowledge Portal: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/afghanistan>
- Climate Change Knowledge Portal (b). (2022). *Iran, Islamic Rep.* Retrieved from Climate Change Knowledge Portal: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/iran-islamic-rep>
- Climate Change Knowledge Portal (c). (2022). What is the rationale behind Climate Change Knowledge Portal (CCKP)? Retrieved from Climate Change Knowledge Portal: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>
- کاهش بوده است. اقلیم به عنوان یک پارامتر مهم از کل اتفاقات، تبدیل به مخاطرات می‌شود. بررسی آمار مخاطرات طبیعی ناشی از تغییر اقلیم در ۴۰ سال اخیر نشان می‌دهد که سیل، زلزله و طوفان در ایران و سیل، زلزله و رانش زمین در افغانستان بیشترین حوادث رخ داده هستند و حادثه خشکسالی در سال ۱۹۹۹ در ایران (بیش از ۵۰ میلیون نفر) و در سال ۲۰۱۸ در افغانستان (بیش از ۱۳ میلیون نفر) بیشترین افراد را تحت تأثیر قرار داده است.
- تجزیه و تحلیل‌های فوق نشان می‌دهند که هر دو کشور ایران و افغانستان از نظر علمی از سه منظر الگوهای افزایش دما، کاهش بارندگی و همچنین مخاطرات طبیعی، دارای قرابت موضوعی هستند. این دو کشور در حال حاضر شروع به تجربه اثرات نامطلوب اولیه‌ی تغییر اقلیم کرده‌اند و در آینده نیز تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرند و پیامدهای تغییر اقلیم و خسارات ناشی از آن به دلیل وقوع حوادثی مانند زلزله و سیل، در شرایط آتی، تشدید نیز خواهد شد. اگر به دنبال یک استراتژی جامع، سه‌گانه و سازگار با محیط زیست برای مقابله با تغییر اقلیم باشیم، اولین و مهم‌ترین گزینه تالاب‌ها هستند و حفظ و احیای آن‌ها نه تنها برای حفظ اکوسیستم در شرایط فعلی، حیاتی است بلکه در شرایط آتی نیز که تغییر اقلیم، کل اکوسیستم و کل منطقه و جهان را تهدید می‌کند، به عنوان یک عامل بسیار مهم در نظر گرفته می‌شود و یک عرصه حیاتی آبی مهم است. با توجه به اینکه عدم قطعیت در پارامترهای اقلیمی و تغییرات آن منجر به کاهش آورد رودخانه‌ی هیرمند شده است و همچنین اقدامات بالادستی در کاهش جریان ورودی به کشور، لزوم تغییر نگاه به مدیریت منابع آب در پیوند با سایر مسائل منطقه را اجتناب‌ناپذیر کرده است، لذا در صورت عدم همکاری طرفین ایرانی و افغانستانی در استفاده از هیرمند و از دست رفتن تالاب هامون هیرمند، هر دو کشور متأثر از نوسانات جریان و تغییرات اقلیمی می‌باشند که به نفع هیچ‌یک از طرفین نیست و با چالش‌های بسیار جدی‌تری مواجه خواهند شد و توجه به موضوع تغییر اقلیم را می‌بایست نه به عنوان بهانه‌ای برای سوء مدیریت‌ها

- Farzaneh, M. and Banimostafaarab, F. (b) (2023). Analysis of climate change adaptation laws in developing countries, *Climate Change Research*, 4(13), 35-54. doi: 10.30488/ccr.2023.394431.1128 [In Persian].
- Farzaneh, M. R., Eslamian, S. and Mirnezami, S. J. E. (2014). Climate change: Uncertainty, impact, and adaptation, In *Handbook of engineering hydrology* (pp. ۱۴۳-۱۶۲). CRC Press.
- Ghiami-Shamami, F., Sabziparvar, A. A. and Shinoda, S. (2019). Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 875-897.
- Hadi, F., Khashei Siuki, A., Shahidi, A. and Farzaneh, M. R. (2016). Examination the Effect of Climate Change on Potential Evapotranspiration in Different Climates, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(2), 230-240.
- IPCC (a). (2021). Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215-2256, doi:10.1017/9781009157896.022
- IPCC (b). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Jahanshahi, R., Mali, S. and Hamidianpour, M. (2022). Forecasting the flooding in the site of the Zabol gas transmission line, in the Hamoun Wetland, using climate change and hydrological models, *Hydrogeology*, 6(2), 1-12. doi: 10.22034/hydro.2022.12559 [In Persian].
- Januta, A. (2021). Explainer: The U.N. climate report's five futures - decoded. Retrieved from Reuters: <https://www.reuters.com/business/environment/un-climate-reports-five-futures-decod>
- Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., ... and Vignati, E. (2019). Fossil CO2 and GHG emissions of all world countries. Publication Office of the European Union: Luxemburg.
- Cross, N. R. (2019). *Overlapping vulnerabilities: the impacts of climate change on humanitarian needs*. Oslo: Norwegian Red Cross.
- Davis, D. (2001). *Functions and Values of Wetlands*. Environmental Protection Agency (EPA).
- Delghandi, M., Joorablou, S. and Ganji Nowroozi, Z. (2023). The impact of climate change on severity, duration and magnitude of drought using SPI and RDI in Semnan region, *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(1), 1-18. doi: 10.22077/jdcr.2023.5909.1004. [In Persian].
- Enayatmehri, H. and Abassi Ashlaghi, M. (2022). Investigating the Impact of Helmand Hydro-politics on Political and Security Relations between Iran and Afghanistan 2018-2002, *Political Sociology of Iran*, 4(4), -. doi: 10.30510/psi.2022.341813.3451 [In Persian].
- Faizee, M. (2022). The emerging dynamics for conflict and cooperation between iran and the Taliban over the Helmand River. Retrieved from WPS: <https://waterpeacesecurity.org/info/blog-09-09-2022>
- Fakhri, M., Farzaneh, M. R., Eslamian, S., and Hosseinipour, E. Z. (2011). Uncertainty analysis of downscaled precipitation using LARS-WG statistical model in Shahrekord station, Iran, *In World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability* (pp. ۴۵۷۲-۴۵۷۸).
- Fakhri, M., Farzaneh, M. R., Eslamian, S., and Khoradadi, M. J. (2012). Confidence interval assessment to estimate dry and wet spells under climate change in Shahrekord station, Iran.
- Farsha Saeed, P. and Khodarahmi, E. (2016). Investigating how to resolve the dispute caused by the Sistan title in the Hirmand river based on the treaty of 1973. 3rd International Conference on Modern Research in Management, Economics & Humanities.[In Persian].
- Farzaneh, M. and Banimostafaarab, F. (a) (2023). Analysis of climate change adaptation laws in developed countries. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(1), 49-70. doi: 10.22077/jdcr.2023.6024.1009 [In Persian].

- plied and Basic Sciences*, 8(9), 838-225.
- Ramsar. (2011). Wetland ecosystem services Fact-sheet 6 - Reservoirs of biodiversity. Ramsar.
- Rose, S. (2014). Climate Change Adaptation and Mitigation. FAO, Forestry Department.
- Rosvold, E. L., Funnemark, A., Grand, A. O., Tarif, K. and Smith, E. (2021). Climate, Peace and Security Fact Sheet: Afghanistan. Nupi & Sipri.
- Sayed, N. and Sadat, S. H. (2022). Climate change compounds longstanding displacement in Afghanistan. Migration Policy Institute.
- Shadkam, S., Ludwig, F., van Oel, P., Kirit, Ç. and Kabat, P. (2016). Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake, *Journal of Great Lakes Research*, 42(5), 942-952.
- Shokri, U. (2023). The Iran-Afghanistan Water Dispute: Implications, Challenges, and Potential Resolutions. Retrieved from EPC: <https://epc.ae/en/details/brief/the-iran-afghanistan-water-dispute-implications-challenges-and-potential-resolutions>
- Solaymani, M., Athari, S. A. and Miri, G. R. (2020). Field study of the impact of Afghanistan's water policies on the Sistan region. *Research Political Geography Quarterly*, 5(3), 89-109. doi: Doi:org/10.22067/pg.v5i3.2012-1004 [In Persian].
- UN Water. (2022). Transboundary Waters. Retrieved from UN Water: <https://www.unwater.org/water-facts/transboundary-waters>.
- UNFCCC. (2015). Islamic Republic of Afghanistan Intended Nationally Determined Contribution Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC.
- United Nations (a). (2022). What Is Climate Change? Retrieved from United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- United Nations (b). (2023). Transboundary Water Management Cooperation Crucial for Sustainable Development, Peace, Security, Speakers Stress at Conference's Fourth Interactive Dialogue. Retrieved from United Nations: <https://press.un.org/en/2023/envdev2056.doc.htm>
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464.
- Van Niekerk, D. (2011). Introduction to disaster risk ed-2021-08-09/
- Karami, R., Rezaei, H., Salmanmahiy, A. and Ghorbani, K. (2022). Conceptual model of participatory management of Hamoun International Wetlands based on grounded Theory, *Environmental Sciences*, 20(2), 41-60. doi: 10.52547/envs.2021.1009 [In Persian].
- Khalaj Amirhosseini, Y. and Najafi, A. (2011). An overview of the history of drafting agreements on the Hirmand border river between Iran and Afghanistan, *International Conference on Traditional Knowledge for Water Resources Management* [In Persian].
- Khalili, M. and Hashemi, S. (2018). Helmand title and its history, *Foreign Relations*, 9(4), 31-61. [In Persian].
- Koocheki, A., Nasiri mahalati, M. and Jafari, L. (2015). Evaluation of Climate Change Effect on Agricultural Production of Iran: I. Predicting the Future Agroclimatic Conditions, *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13(4), 651-664. doi: 10.22067/gsc.v13i4.51156 [In Persian].
- Lolu, A. J., Ahluwalia, A. S., Sidhu, M. C., Reshi, Z. A. and Mandotra, S. K. (2020). Carbon sequestration and storage by wetlands: Implications in the climate change scenario, *Restoration of wetland ecosystem: A trajectory towards a sustainable environment*.
- Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M. and Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics, *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-10.
- Moosazadeh, R. and Abbaszadeh, M. (2016). Legal Aspects of Exploitation of Hirmand Border River by Iran and Afghanistan, *Central Asia and The Caucasus Journal*, 22(93), 159-183. [In Persian].
- Najafi, A. and Vatanfada, J. (2013). Transboundary water management improvements, the way forward in the middle east; case study: transboundary water management of Iran and neighbors, *Geopolitics Quarterly*.
- NEPA and UNEP. (2015). Climate Change and Governance in Afghanistan, Kabul: National Environmental Protection Agency and United Nations Environment Programme.
- Nuri, A. Z., Farzaneh, M. and Espanayi, K. (2014). Assessment of climatic parameters uncertainty under effect of different downscaling techniques. *International Research Journal of Ap-*

- reduction. USAID.
- Van Valkengoed, A. M. and Steg, L. (2019). Climate change adaptation by individuals and households: A psychological perspective.
- WBG and ADB (2021). Climate Risk Country Profile: Afghanistan (2021): The World Bank Group and the Asian Development Bank
- WFP, UNEP, and NEPA. (2016). Climate Change in Afghanistan: What does it mean for rural livelihoods and food security? WFP, UNEP and NEPA.
- WWD (a). (2016). Wetlands: Providing more than a billion livelihoods. WWD.
- WWD (b). (2020). Wetland Biodiversity Why it matters. WWD.
- Zamani Nuri, A., Farzaneh, M. R., Fakhri, M., Dokoo-haki, H., Eslamian, S. and Khordadi, M. J. (2013). Assessment of future climate classification on Urmia Lake basin under effect of climate change. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 3(2), 128-140.
- Zolfaghari, F. and Khosravi, M. (2021). Evaluation of the causes of drought in Hamoun International Wetland using precipitation, dust and dryness indicators, *Journal of Wetland Ecobiology*, 13(49), 73-86. [In Persian].



Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran using Remote Sensing

Mohadese Sadat Fakhar¹, Bijan Nazari^{2*}

1. Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*Corresponding Author: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir

Keywords:

CHIRPS data, Drought indices, Impacts of drought, Remote sensing.

Extended Abstract

Introduction

Drought is one of the most important and common weather-climatic disasters that have affected different countries around the world. Since drought affects various parts of countries, such as water resources, agriculture, industry, the economy and health, it requires collective and international solutions. Therefore, it seems necessary to investigate this phenomenon in different parts of the world. Drought modeling is an important issue in order to curb or reduce its effects, inform people about its consequences, and plan for the preservation of water resources and social and economic management.

Material and Method

Study area

The studied area is the entire country of Iran, which is located between 25° and 40° North and 44° and 64° East. It covers an area of approximately 1,648,000 square kilometers (Kaboli et al., 2021). Iran is the 17th largest country in the world in terms of area. One of the country's most noticeable characteristics is drought, which typically affects more than two thirds of it and is partly a result of the Iranian plateau's location in the semi-arid tropical belt and surrounding mountains. The average annual temperature in summer is 38 degrees Celsius. The north and northwest regions of the country usually experience temperatures below zero degrees in winter and have humid weather almost the rest of the year (Shahabfar and Eitzinger, 2013). According to Domarton's definitions, Iran has super-arid, dry, and semi-arid regions. The slopes of the Alborz and Zagros mountain ranges are semi-arid (Rahimi et al., 2013). A prolonged period of low rainfall and improper water management has caused devastating droughts in Iran (Jafari et al., 2020). The aim of this study is to identify and describe drought using multiple MODIS-based indicators. For this purpose, the

Received:

02 December 2023

Revised:

22 December 2023

Accepted:

14 January 2024

How to cite this article:

Sadat Fakhar, M., & Nazari, B. (2024). Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran using Remote Sensing. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 39-58. [10.22077/JDCR.2024.7011.1050](https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.7011.1050)



temporal-spatial characteristics of the intensity and frequency of drought in the entire country in the period from 2001 to 2021 using the standardized precipitation index to one-month SPI-1, three-month SPI-3, and one-year SPI-12, based on the CHIRPS precipitation dataset with a spatial resolution of 5 km, vegetation condition index (VCI), temperature condition index (TCI), and vegetation health index (VHI), were investigated based on specific classifications.

Results and Discussion

The results of the investigations showed that the distribution of rainfall in the southeastern and central regions of the country is less than 200 mm per year. Examining the ratio of drought classes based on the TCI index shows that the area ratio of areas that are in severe drought class in 2020 and 2021 is 36.7% and 43.2%, respectively, which has increased by about 7%. The comparison of the area of the drought class of the TCI and VCI indices also shows that the VCI index has overestimated the area of the droughts that are in the severe drought class by 3.7% and 5.1% in 2020 and 2021, respectively. Examining the difference in drought classification area based on VCI and TCI indices shows that the area ratio of classes that are located in drought-free areas based on the VCI index is about 16.8% higher TCI index.

The drought classification map based on VHI shows that the largest area of the country in 2021 will be covered by severe drought. Most droughts occurred in the central, eastern and southeastern regions. The trend of changes in the indicators shows that the eastern, and southeastern regions and the southern regions of the country are located in areas with severe drought due to the type of climate zoning, but another important point that is important is that a relatively large area of the country was one of the drought-free areas until 2014. It has been gradually reduced, and even the areas that include temperate and drought-free areas have been associated with stress and drought.

Also, the VHI index analysis shows that six provinces in the southern region of the country have experienced long-term drought between 2009 and 2021. Examining the drought trend based on the comparison of different classes of drought using the SPI index shows that the SPI-12 index has provided more acceptable results in order to investigate and monitor the drought over a period of 20 years. In general, the investigations carried out in this research can be effectively used by relevant decision-makers for drought risk management, resilience, sustainable agriculture, and policymaking.



پایش و ارزیابی ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی در ایران با استفاده از سنجش از دور

محدثه السادات فخار^۱، بیژن نظری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
 ۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

*نویسنده مسئول: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

این مطالعه به شناسایی و توصیف خشکسالی با استفاده از شاخص‌های چندگانه مبتنی بر MODIS می‌پردازد. بنابراین ویژگی‌های زمانی - مکانی شدت و فراوانی خشکسالی در کل کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده به صورت یک‌ماهه SPI-1، سه‌ماهه SPI-3 و یک‌ساله SPI-12، براساس مجموعه داده بارش CHIRPS با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت دما (TCI) و شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) مورد بررسی قرار گرفت. پراکندگی بارندگی در نواحی جنوب شرقی و نواحی مرکزی کشور کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال است. بررسی نسبت کلاس‌های خشکسالی بر اساس شاخص TCI نشان می‌دهد نسبت مساحت مناطقی که در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در کلاس خشکی شدید قرار دارند به ترتیب ۳۶/۷ درصد و ۴۳/۲ درصد بوده که حدود ۷ درصد افزایش داشته است. مقایسه مساحت کلاس خشکسالی دو شاخص TCI و VCI نیز نشان می‌دهد که شاخص VCI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به میزان ۳/۷ درصد و ۵/۱ درصد سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار دارند را بیشتر برآورد نموده است. همچنین شاخص VHI نشان می‌دهد ۶ استان ناحیه جنوبی کشور، بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی طولانی‌مدت را تجربه کرده‌اند. به‌طور کلی، بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که خشکسالی در کشور در سال‌های اخیر در حال افزایش است و مناطقی در جنوب شرقی و مرکزی کشور بیشتر در معرض خطر قرار دارند. این امر نشانگر نیاز به اقدامات فوری در زمینه مدیریت منابع آبی، کشاورزی پایدار و اقتصاد سبز است. به‌طور کلی بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌طور مؤثر توسط تصمیم‌گیرندگان مربوطه جهت مدیریت ریسک خشکسالی، تاب‌آوری، کشاورزی پایدار و سیاست‌گذاری مورداستفاده قرار گیرد.

اثر خشکسالی، داده CHIRPS، سنجش‌از‌دور، شاخص‌های خشکسالی.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۱۱

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۰/۲۴

مقدمه

خشکسالی یک پدیده طبیعی است که سیستم‌های مختلف اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Carrão et al., 2016). خشکسالی عموماً ناشی از تغییرات اقلیمی است، مانند دوره‌های بارندگی کمتر که منجر به کمبود آب در نقاط خاصی از چرخه آب یا در طول چرخه می‌شود (McKee et al., 1993). خشکسالی منجر به تخریب خاک، افزایش بیابان‌زایی، تخریب پوشش گیاهی، آتش‌سوزی و سایر پدیده‌های مختلف می‌گردد (Doughty et al., 2018). تغییر در الگوی بارندگی و دما از عوامل تعیین‌کننده خشکسالی است که موجب خسارت قابل توجه به کشاورزی و تولید محصول می‌شود (Zhao et al., 2022). بنابراین، پایش و ارزیابی خشکسالی و تحلیل پویایی مکانی و زمانی آن در مقیاس‌های زمانی متعدد برای حفاظت از محیط‌زیست طبیعی، احیای مراتع و تعادل منابع زمین و آب در برابر شرایط خشکسالی منطقه ضروری است (Jalayer et al., 2022). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که جمعیت جهان در ۳۰ سال آینده بیش از ۷۰ درصد افزایش می‌یابد که این افزایش جمعیت می‌تواند منجر به افزایش شدت خشکسالی شود و می‌تواند تأمین مواد غذایی را در کشورهای مختلف با چالش روبه‌نماید (Sivakumar, 2021). متأسفانه حدود ۴۰ درصد از مردم آسیا و اقیانوسیه به دلیل خشکسالی و تغییرات آب و هوایی دچار سوء تغذیه و در معرض ناامنی غذایی هستند (Wang et al., 2022). تحقیقات کاربردی در مورد هر نوع خشکسالی به‌طور مؤثری باعث بهبود توانایی جامعه بشری برای واکنش به بلایای خشکسالی می‌شود (Zhao et al., 2022). در طولانی‌مدت استفاده از داده‌های محیطی و اقلیمی برای ایجاد شاخص خشکسالی مؤثرترین روش شناسایی خشکسالی در نظر گرفته‌شده است (Xu et al., 2021). یکی از قابل مدیریت‌ترین گام‌هایی که می‌توان برای کمک به کاهش اثرات خشکسالی برداشت، مدیریت پایدار آب و همچنین استفاده از مجموعه داده‌های سنجش‌از‌دور برای ارزیابی متغیرهای مرتبط با خشکسالی و طبقه‌بندی شدت خشکسالی در مناطق بزرگ است (Alahacoon et al., 2021). خشکسالی اغلب

به چهار دسته اصلی خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیکی، خشکسالی کشاورزی و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی تقسیم‌بندی می‌شود (Sharifi et al., 2022). خشکسالی هواشناسی عمدتاً ناشی از کاهش بارندگی است و خشکسالی کشاورزی عمدتاً در کاهش تولیدات کشاورزی و تخریب جنگل‌ها و مراتع به دلیل تأمین ناکافی آب برای پوشش گیاهی ظاهر می‌شود (Souza et al., 2021). شروع خشکسالی کشاورزی اغلب با کمبود و یا تعویق فصلی شروع می‌شود که منجر به افزایش تنش آبی گیاه، کاهش رطوبت خاک، افزایش تبخیر-تعرق گیاه و از بین رفتن محصول می‌شود. تنش‌های رطوبتی و حرارتی هر دو در برآورد وضعیت کلی پوشش گیاهی مهم می‌باشد (Kogan, 2001). خشکسالی هیدرولوژیکی به‌عنوان کمبود منابع آب سطحی و زیرزمینی تعریف می‌شود که با ارزیابی جریان رودخانه، برف و سطح دریاچه و آب زیرزمینی قابل‌اندازه‌گیری است (Qin et al., 2021). برای درک ارتباط بین خشکسالی‌های کشاورزی و هواشناسی، بررسی همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع اقلیم ضروری است (Prodhan et al., 2021). روش‌های سنتی برای پایش شرایط خشکسالی بر اساس اندازه‌گیری‌های زمینی متغیرهای اقلیمی، از جمله بارندگی، دما، رطوبت نسبی و محتوای آب خاک می‌باشد (Dasari et al., 2017). در پژوهشی در سال ۱۹۶۵ شاخص شدت خشکسالی (PDSI) توسط پالمر پیشنهاد گردید که اطلاعات بارش، تبخیر و تعرق، رواناب و رطوبت خاک را تحت اصل بیلان آب در نظر می‌گیرد (Palmer, 1965). شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص دمای سطح زمین (LSt) دو پارامتر کلیدی به‌دست‌آمده از داده‌های طیفی سنجنده MODIS هستند که رطوبت و شرایط حرارتی پوشش گیاهی را نشان می‌دهد (Tucker and Choudhury, 1987). شاخص وضعیت گیاهی (VCI) و وضعیت حرارتی (TCI) دو شاخص خشکسالی هستند که به ترتیب با استفاده از مقادیر بلندمدت NDVI و LSt به دست می‌آیند (Dutta et al., 2015). در پژوهش دیگری، شاخص‌های VCI و TCI با یکدیگر ترکیب و شاخص جدید سلامت گیاهی (VHI) پیشنهاد داده شد

پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی استاندارد شده در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. محققان در این پژوهش همبستگی میان شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده با شاخص VCI و TCI را برای یافتن ضریب همبستگی پیرسون بررسی نمودند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد شاخص‌های VHI و SPEI همبستگی بهتری دارند و شاخص‌های خشکسالی برای پایش خشکسالی در مناطق فوق خشک مناسب هستند (Ejaz et al., 2023). لذا به‌طور کلی پژوهش‌های صورت گرفته به بررسی خشکسالی، عوامل تعیین‌کننده آن و تأثیرات آن بر سیستم‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیطی می‌پردازند. هدف اصلی این مقالات، پایش و ارزیابی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متعدد و ارائه روش‌ها و شاخص‌های مؤثر جهت شناسایی خشکسالی است. در این راستا، استفاده از داده‌های محیطی و اقلیمی، مدیریت پایدار آب، و استفاده از مجموعه داده‌های سنجش‌ازدور برای ارزیابی متغیرهای مرتبط با خشکسالی و طبقه‌بندی شدت آن مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین مطالعات مذکور به اهمیت حفاظت از محیط‌زیست طبیعی، احیای مراتع و تعادل منابع زمین و آب در برابر شرایط خشکسالی اشاره می‌کنند. بنابراین در این پژوهش از شاخص‌های ترکیبی خشکسالی به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی و تحلیل ارتباط بین آن‌ها استفاده شده است. به همین منظور برای درک بهتری از شرایط محیطی به بررسی شاخص‌های VCI، TCI، VHI و PCI در یک بازه زمانی ۲۰ ساله در مقیاس کل کشور پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

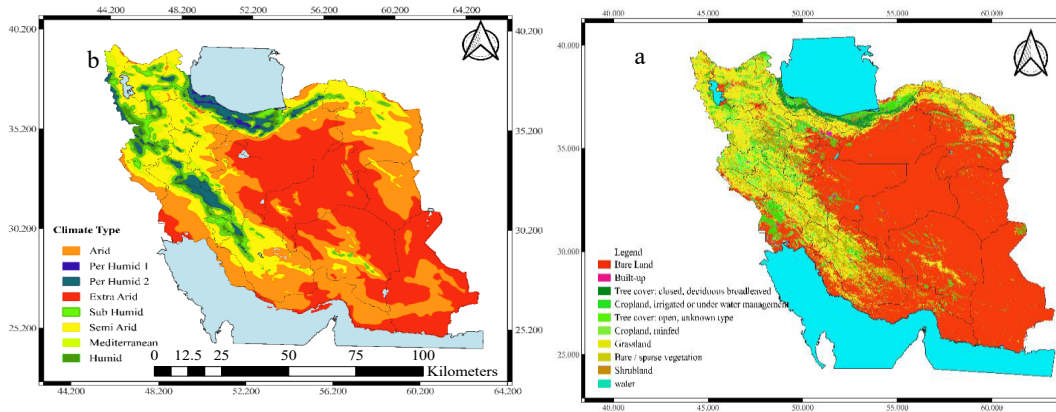
منطقه مورد مطالعه

کشور ایران با مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی قرار دارد. (Kaboli et al., 2021). خشکسالی یکی از ویژگی‌های بارز کشور است که معمولاً در اکثر نقاط کشور با شدت‌های مختلف رخ می‌دهد که بخشی از آن به دلیل محاصره فلات ایران توسط کوه‌ها و قرار گرفتن آن در کمربند نیمه‌خشک گرمسیری است.

(Kogan, 2002). در حال حاضر، بسیاری از مطالعات از شاخص‌های مختلف خشکسالی برای تحقیق در مورد ویژگی‌های الگوی مکانی و زمانی خشکسالی تحت شرایط گرمایش جهانی استفاده کرده‌اند. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده توسط مطالعات مختلف اغلب متناقض و حتی مخالف هستند. داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای قادرند به‌طور مداوم توزیع مکانی و زمانی از رشد محصولات و وضعیت خشکسالی را ثبت نمایند (Zhou et al., 2020). بنابراین خشکسالی را می‌توان بر اساس تغییرات مشاهده‌شده در سلامت پوشش گیاهی و همچنین پوشش اراضی سطح زمین با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور مورد ارزیابی قرار داد (Silleos et al., 2006). در پژوهشی، با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و چندین شاخص خشکسالی، وضعیت خشکسالی در استان سیچوان چین بررسی شد که نتایج نشان از خشکسالی شدید بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ می‌دهد (Ji et al., 2018). در پژوهش دیگری محققان به بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در کشور اتیوپی پرداختند که نتایج حاصله بیانگر این بود که به‌منظور برنامه‌ریزی بهتر در مقابله با خشکسالی، بایستی تفاوت‌های بین خشکسالی کشاورزی و هواشناسی هر منطقه مشخص شود (Bayissa et al., 2019). در پژوهشی دیگر به پایش خشکسالی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ میلادی با استفاده از سنجنده MODIS پرداخته شد که محققان از شاخص‌های مختلفی همچون VCI، TCI و VHI برای توصیف خشکسالی کشاورزی در شمال کشور اتیوپی استفاده کردند. نتایج حاصل از بررسی VCI نشان داد در بازه زمانی مورد مطالعه تقریباً در تمامی سال‌ها خشکسالی کشاورزی دیده شده است. همچنین مشاهده گردید که TCI نسبت به سایر شاخص‌ها تنش خشکی نسبتاً بیشتری را برآورد می‌نماید و شاخص VHI پوشش منطقه را کمتر و سطح تنش کمتری را نسبت به شاخص‌های (VCI و TCI) در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد (Was-sie et al., 2022). در تحقیقی در منطقه بسیار خشک عربستان سعودی از تکنیک سنجش‌ازدور به منظور

آب، خشکسالی‌های ویرانگری را در ایران ایجاد کرده است (Jafari et al., 2020). بر اساس گزارش‌ها، ۵۲۰ میلیون دلار از تولیدات کشاورزی ایران به دلیل شرایط خشکسالی در سال ۲۰۰۱ از بین رفته است (Iranian Ministry of Energy, 2018). در حال حاضر یکی از جدیدترین روش‌های تهیه نقشه کاربری اراضی مدل Dynamic World است که نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متر را تهیه می‌کند (Brown et al., 2022). به همین منظور آخرین نقشه کاربری اراضی که مربوط به سال ۲۰۲۱ است، با استفاده از مدل Sentinel-2 و بر اساس تصاویر 2 در کلاس در سامانه GEE تهیه گردید که در شکل (۱) قابل ملاحظه است.

نواحی شمال و شمال غرب کشور به‌طورمعمول در زمستان دمای زیر صفر درجه را تجربه می‌کنند و تقریباً در بقیه فصول سال آب‌وهوای مرطوبی را دارند (Shahabfar and Eitzinger, 2013). میانگین بارندگی در نواحی رشته‌کوه‌های البرز شمالی بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر است. کوه‌های البرز و زاگرس به ترتیب بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ و ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر بارندگی دارند. اما نواحی مرکزی با کاهش قابل‌توجه بارش روبه‌رو هستند. نواحی مرکزی ایران چندین سال است که بارشی نداشته است. بر اساس تعاریف دومارتن، ایران دارای مناطقی فوق خشک، خشک و نیمه‌خشک است. دامنه‌های رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس نیمه‌خشک هستند (Rahimi et al., 2013). یک دوره طولانی مدت کم‌بارش و مدیریت نامناسب



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی اقلیمی (a) و نقشه طبقه‌بندی کاربری پوشش اراضی ایران (۲۰۲۱) (b)
 Fig 1. a) Climatic zoning map and b) land use/cover classification map of Iran (2021)

می‌کند. در این پژوهش با توجه به این که مجموعه داده CHIRPS وضوح مکانی بالاتری را نسبت به سایر روش‌های مطرح‌شده دارد (Paredes-Trejo et al., 2017)، بنابراین از این مجموعه داده برای بررسی استفاده شد. سپس مجموعه داده‌های بارش روزانه CHIRPS به مقادیر ماهانه تجمیع و شاخص SPI به‌صورت یک‌ماهه با نام SPI-1، سه‌ماهه SPI-3 و یک‌ساله SPI-12 محاسبه گردید. داده‌های روزانه CHIRPS را می‌توان به صورت روزانه از طریق پلتفرم GEE محاسبه کرد (https://developers.google.com/earth-engine/data-sets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY). پلتفرم GEE یک ابزار قدرتمند سنجش از دور برای استخراج اطلاعات کاربردی از تصاویر ماهواره‌ای است. این

داده‌های مورد استفاده

الف- داده‌های بارش

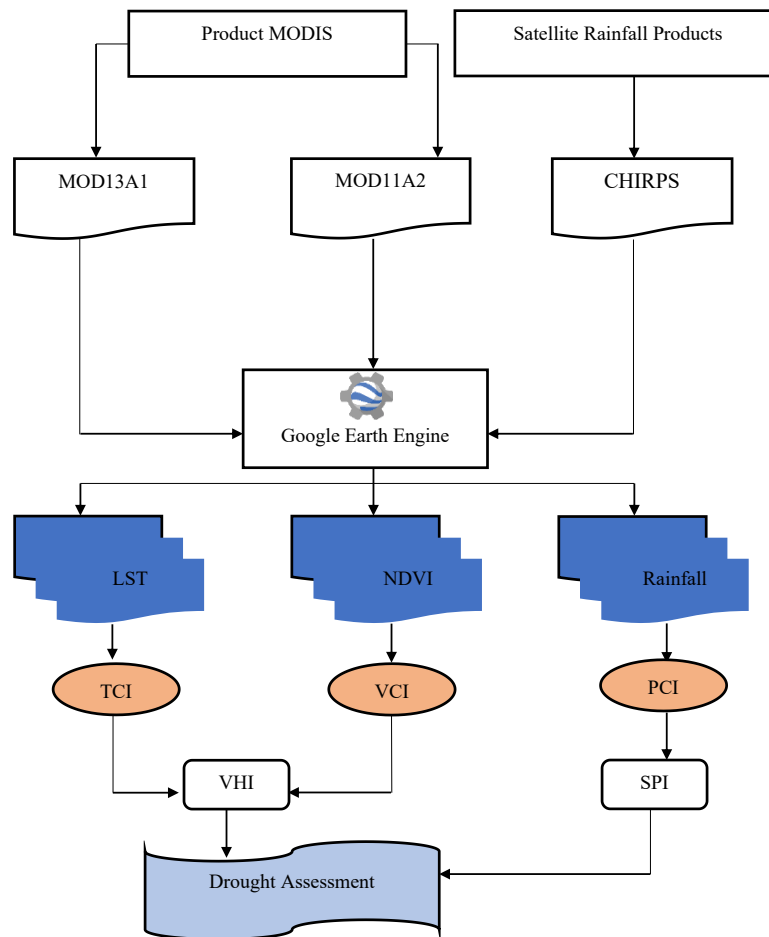
داده‌های بارش مورد استفاده در این مطالعه شامل مجموعه داده‌های بارش روزانه CHIRPS است (Funk et al., 2015). در حال حاضر مجموعه داده‌های بارش متنوعی وجود دارد که این مجموعه داده شامل داده‌های بارش روزانه جهانی از سال ۱۹۸۱ تا حال حاضر است. به‌عنوان مثال مجموعه داده‌های بارش رایج مانند TRMM با تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر، GPM با تفکیک مکانی ۱۱ کیلومتر، PERSIANN با تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر و مجموعه داده CHIRPS با وضوح مکانی ۵ کیلومتر امکان بررسی میزان بارش را به‌صورت روزانه و برحسب میلی‌متر فراهم

قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر استفاده شد. داده‌های سنجنده MODIS به دلیل تصویربرداری در بازه زمانی طولانی مدت می‌تواند نتایج ارزشمندی را در اختیار کاربران و کارشناسان حوزه سنجش‌ازدور قرار دهند. با توجه به این که پدیده خشکسالی به صورت آنی رخ نمی‌دهد و تأثیرات آن بعد از گذشت چندین ماه و یا چندین سال نمایان خواهد شد لذا در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات سری زمانی و مکانی به بررسی تغییرات خشکسالی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در پلتفرم GEE پرداخته شد که در مجموع ۵۰۶ تصویر از محصول MOD13A1 و ۱۰۰۵ تصویر از محصول MOD11A2 دریافت شد.

پلتفرم برای استفاده در تحقیقات علوم زمین طراحی شده است. از جمله مزایای این پلتفرم می‌توان به مقرون‌به‌صرفه بودن و پردازش سریع داده‌های مکانی اشاره کرد (Rahaman and Venkatesh, 2020).

ب- داده‌های NDVI و LSt

در این پژوهش از محصولات داده‌های سنجنده MO-DIS از سری تصاویر ماهواره Terra استفاده شده است. لذا از محصولات ۱۶ روزه شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) در قالب فایل MOD13A1 با قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روز و قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و شاخص دمای سطح زمین (LSt) در قالب فایل MOD11A2 با قدرت تفکیک زمانی ۸ روزه و



شکل ۲. روند مراحل مورد بررسی در این پژوهش

Fig 2. Steps process of this research

ج- شاخص‌های خشکسالی
شاخص اولیه برای تحقیقات خشکسالی توسط سازمان جهانی هواشناسی شناخته شد (Fang et al., 2019). در

ج- شاخص‌های خشکسالی

شاخص SPI

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) توسط (McK-

$$VCI = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \times 100 \quad (4)$$

$$TCI = \frac{(LST_{max} - LST)}{(LST_{max} - LST_{min})} \times 100 \quad (5)$$

$$VHI = a \times VCI + b \times TCI \quad (6)$$

که در آن $NDVI_{min}$ ، $NDVI_{max}$ ، LSt_{min} و LSt_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر NDVI و LSt در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲ هستند. a ضریب VCI و b ضریب TCI است. از آنجایی که تعیین سهم آب و دما در رشد پوشش گیاهی دشوار است، هنگام محاسبه VHI، ضریب وزنی مشابهی برای شاخص‌های VCI و TCI انتخاب شد ($a=0.5$, $b=0.5$). (Liu et al., 2021).

د- معیار ارزیابی

جدول (۱) طبقه‌بندی شاخص‌های مختلف خشکسالی را نشان می‌دهد که در آن شرایط خشکسالی در منطقه به شش دسته تقسیم شده است. مقادیر کوچک‌تر شاخص‌ها بیانگر شرایط خشکسالی شدیدتر است. با توجه به سیستم طبقه‌بندی خشکسالی در جدول (۱)، در این پژوهش فراوانی، مدت و شدت خشکسالی در ایران در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ تجزیه و تحلیل شد. محاسبه فراوانی خشکسالی در رابطه (۷) نشان داده شده است:

$$f = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (7)$$

که در آن f فراوانی خشکسالی، m تعداد ماه‌های خشک و n تعداد ماه‌های سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ است.

نتایج و بحث

نتایج برای شاخص‌های مختلف نشان داد که ایران در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ به تدریج در معرض خشکسالی قرار گرفته است. با توجه به این که یکی از متغیرهای مهم در بررسی خشکسالی، بارندگی در سطح منطقه می‌باشد به همین منظور به بررسی میانگین سالانه بارندگی در سطح کل کشور در بازه زمانی مورد مطالعه پرداخته شد. بررسی تغییرات بارندگی شکل (۳) نشان می‌دهد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ میانگین بارندگی از مقدار بالاتری برخوردار است اما به تدریج از میزان آن کاسته

دو دهه گذشته، شاخص SPI به‌طور گسترده‌ای برای تحقیقات مختلف خشکسالی استفاده شده است (Won et al., 2020). محاسبه شاخص SPI را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد. ابتدا در گام اول برازش توزیع گاما در سری زمانی طولانی در یک بازه زمانی خاص به‌منظور یافتن توزیع احتمال بارش انجام و در گام دوم توزیع احتمال گاما به توزیع نرمال به‌عنوان SPI تبدیل می‌شود (Hughes and Saunders, 2002). در این پژوهش شاخص SPI در کل کشور به‌صورت یک‌ماهه SPI-1، سه‌ماهه SPI-3 و یک‌ساله SPI-12 در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ محاسبه شد. هنگامی که $SPI < 0$ ، نشان‌دهنده بارندگی بیشتر از مقدار متوسط، و شرایط محیطی مرطوب خواهد بود و زمانی که $SPI > 0$ ، نشان‌دهنده وضعیت خشک است که تابع توزیع تناوب آن به شرح زیر است (Zhao et al., 2022).

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-x^2/2} dx \quad (1)$$

SPI را می‌توان با معادلات (۲) و (۳) محاسبه کرد:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[d_3 t + d_2] t + d_1} t + 1.0 \quad (2)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}} \quad (3)$$

در این معادلات:

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = \\ F \leq 0.5, S = -1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308 \\ ; F > 0.5, S = 1$$

شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)

شاخص وضعیت پوشش گیاهی توسط (Kogan, ۱۹۹۰) پیشنهاد شد که با استفاده از شاخص‌های NDVI و LSt و روابط VCI و TCI بررسی می‌شود (Kogan, ۲۰۰۱). VCI و TCI به ترتیب تغییرات پوشش گیاهی و دمای سطح زمین را در طول زمان و مکان منعکس می‌کنند و روش محاسبه در معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده است. مقادیر پایین NDVI و LSt بالا معمولاً با رویدادهای شدید خشکسالی همراه است. با ترکیب معادلات (۴) و (۵) می‌توان دریافت که مقادیر کوچک‌تر VCI و TCI بیانگر خشکسالی شدیدتر است. بنابراین، هنگامی که یک رویداد خشکسالی شدید رخ می‌دهد، VHI مقدار کمتری دارد.

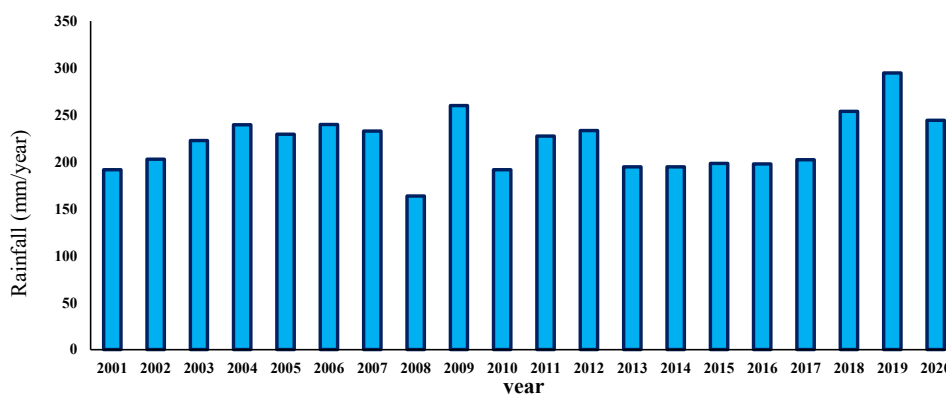
جدول ۱. طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص خشکسالی (Zhao et al., 2022).

Table 1. Classification of drought severity based on drought index (Zhao et al., 2022).

کلاس بندی	Classification		شاخص	شاخص	شاخص	شاخص	
			استاندارد شدت بارش SPI	سلامت گیاهی VHI	وضعیت دما TCI	وضعیت گیاهی VCI	
کلاس-۱	Class-1	خیلی مرطوب	Very humid	>1	>50	>50	>50
کلاس-۲	Class-2	مرطوب متوسط	Moderately humid	0 to 1	40 to 50	40 to 50	40 to 50
کلاس-۳	Class-3	خشکسالی ضعیف	Weak drought	0 to -0.99	30 to 40	30 to 40	30 to 40
کلاس-۴	Class-4	خشکسالی متوسط	Moderate Drought	-1 to -1.49	20 to 30	20 to 30	20 to 30
کلاس-۵	Class-5	خشکسالی شدید	Severe Drought	-1.5 to -2	10 to 20	10 to 20	10 to 20
کلاس-۶	Class-6	خشکسالی بسیار شدید	Extreme Drought	<-2	<10	<10	<10

مناطق جنوب شرقی و مرکزی ایران، با میانگین بارش سالیانه پایین‌تر از حد نرمال، در بیشتر موارد با خشکسالی مواجه هستند. که از جمله دلایل مقدار کم بارندگی در این نواحی می‌توان به قرارگیری این منطقه در اقلیم خشک و بدون پوشش گیاهی اشاره کرد.

می‌شود. به طوری که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ در کمترین مقدار خود قرار دارد که این می‌تواند نشان از تشدید پدیده خشکسالی در سطح کشور باشد. علاوه بر میزان بارندگی، نحوه پراکندگی بارندگی نیز در جلوگیری از تشدید خشکسالی می‌تواند مؤثر باشد. بررسی توزیع بارش نشان می‌دهد که



شکل ۳. میانگین بارش سالانه در سطح کشور با استفاده از مجموعه داده CHIRPS

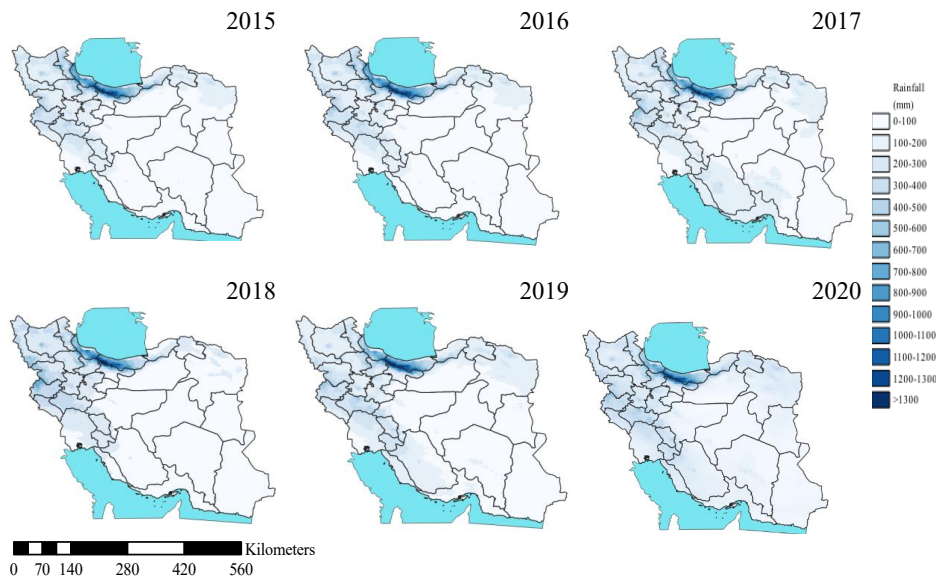
Fig 3. Average annual precipitation in the country using CHIRPS data set

تا ۲۰۱۷ میانگین بارندگی حدود ۴۰۰ mm را داشتند، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ به تدریج به مقدار ۲۰۰ mm و کمتر از آن نزدیک شده است. همچنین نواحی غرب و شمال غرب کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ بر اساس این

گستره بارندگی در نواحی شمال شرق و جنوب غرب کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ به طور میانگین حدود ۳۵۰ mm در سال است که به تدریج از میزان بارندگی این مناطق کاسته شده و نواحی جنوب غرب و جنوبی کشور که در سال‌های ۲۰۱۵

در بررسی مناطق حاشیه دریای خزر شکل (۴) نیز، مشاهده می‌شود که حجم بارش در این مناطق نیز با کاهش همراه بوده و شدت بارش در نواحی مانند آستارا و تالش، با کاهش قابل توجهی روبرو شده است.

طبقه‌بندی میزان بارندگی بین ۶۰۰ mm تا ۸۰۰ mm در سال را داشته که در سال ۲۰۲۰ با مقدار ۴۰۰ mm تا ۶۰۰ mm همراه بوده است. کاهش حجم بارندگی علاوه بر مناطق مرکزی و خشک کشور در نواحی با اقلیم معتدل و مرطوب نیز به وقوع پیوسته است.



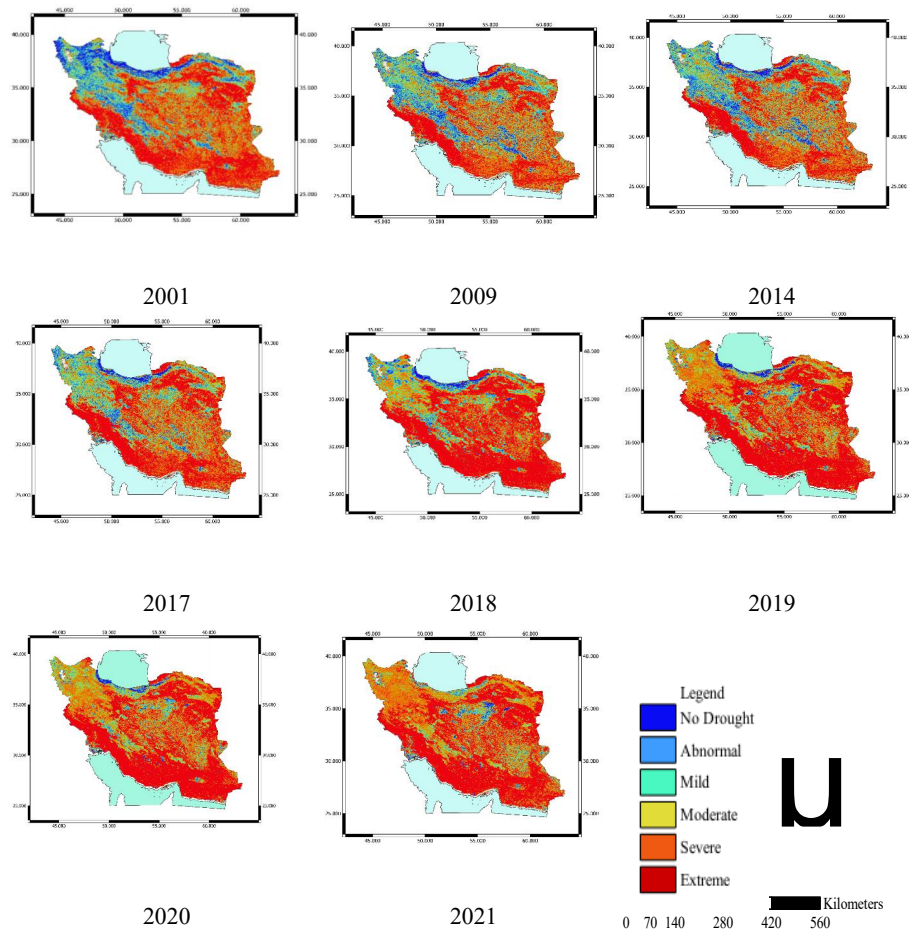
شکل ۴. توزیع پراکندگی بارش در سطح کشور

Fig 4. The distribution of precipitation in the country

در نواحی غرب و شمال غرب کشور با شدت بیشتری افزایش پیدا کرده است بررسی‌ها نشان می‌دهد پهنه وسیعی از استان‌های شمالی کشور و مناطق حاشیه دریای خزر جزء مناطق بدون خشکسالی محسوب می‌شود که روند مساحت این ناحیه به‌طور تقریبی تا سال ۲۰۱۷ از تغییرات زیادی برخوردار نبوده اما از سال ۲۰۱۸ با کاهش جدی روبه‌رو شده است و تنها دو استان مازندران و گیلان و ناحیه محدودی از استان گلستان در کلاس‌بندی مناطق بدون خشکسالی قرار دارند. با این روند تغییرات پیش‌بینی می‌شود که پیشروی خشکسالی در بعضی مناطق مازندران به‌ویژه شرق این استان و غرب استان گیلان عمیق‌تر و جدی‌تر شود. همچنین خشکسالی شدید هر ساله بر اساس شاخص VCI بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است.

شاخص NDVI به‌منظور بررسی و نظارت بر پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شاخص به تنهایی برای بررسی خشکسالی مناسب نیست (Kogan

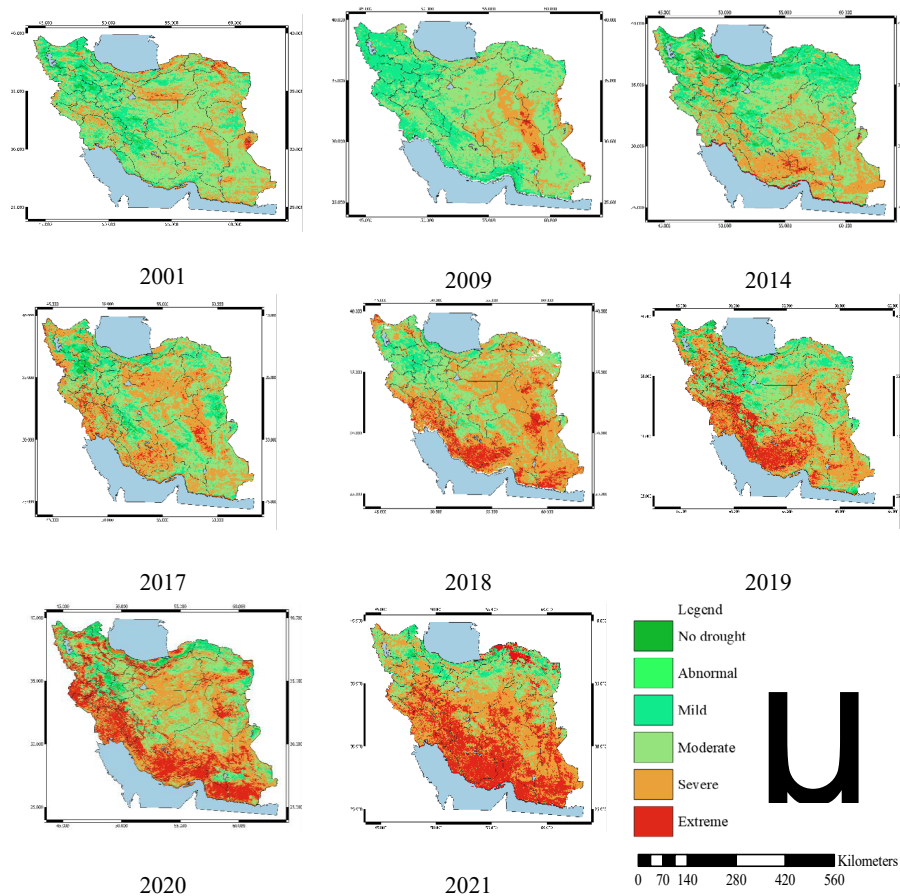
در ادامه شاخص‌های VCI، TCI و VHI بر اساس شاخص‌های NDVI و LSt محاسبه شدند و بر اساس کلاس‌بندی جدول (۱) به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) قابل‌ملاحظه است. بررسی روند تغییرات خشکسالی نشان می‌دهد که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹، روند تغییرات خشکسالی با شدت و سرعت کمتری رخ داده است. به‌طوری‌که در شکل (۵) نیز مشخص است، بیشترین تغییرات در نواحی جنوب و جنوب غرب کشور رخ داده است. در این بازه زمانی، نسبت تغییرات خشکسالی در کلاس‌های بسیار شدید و شدید به ترتیب ۱۶/۱ درصد و ۲۴/۹ درصد افزایش یافته است. یکی از دلایل افزایش مساحت کلاس‌هایی با خشکسالی به نسبت بالا را می‌توان کاهش میزان بارندگی و توزیع نامناسب آن در سطح کشور دانست. بررسی تغییرات خشکسالی بر اساس شاخص VCI در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که روند خشکسالی با شدت بیشتری رو به گسترش است به‌طوری‌که نسبت تغییرات مساحت خشکسالی



شکل ۵. شاخص تغییرات پوشش گیاهی (VCI)
Fig 5. Vegetation Change Index (VCI)

و جنوبی کشور آغاز شده است که در طی سال‌های مختلف گسترش بیشتری داشته و در نهایت در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ بیشترین کلاس از خشکسالی شدید را به خود اختصاص داده است. بررسی نسبت کلاس‌های خشکسالی بر اساس شاخص TCI نشان می‌دهد که نسبت مساحت مناطقی که در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در کلاس خشکی شدید قرار دارند به ترتیب ۳۶/۷٪ و ۴۳/۲٪ بوده که حدود ۷ درصد افزایش داشته است. مقایسه مساحت کلاس خشکسالی دو شاخص VCI و TCI نیز نشان می‌دهد که شاخص VCI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به میزان ۳/۷٪ و ۵/۱٪ سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار دارند را بیشتر برآورد کرده است. بررسی اختلاف مساحت کلاس‌بندی خشکسالی بر اساس دو شاخص VCI و TCI نشان می‌دهد که نسبت مساحت کلاس‌هایی که در مناطق بدون خشکسالی قرار دارند بر اساس شاخص VCI حدود ۱۶/۸٪ بیشتر از شاخص TCI است.

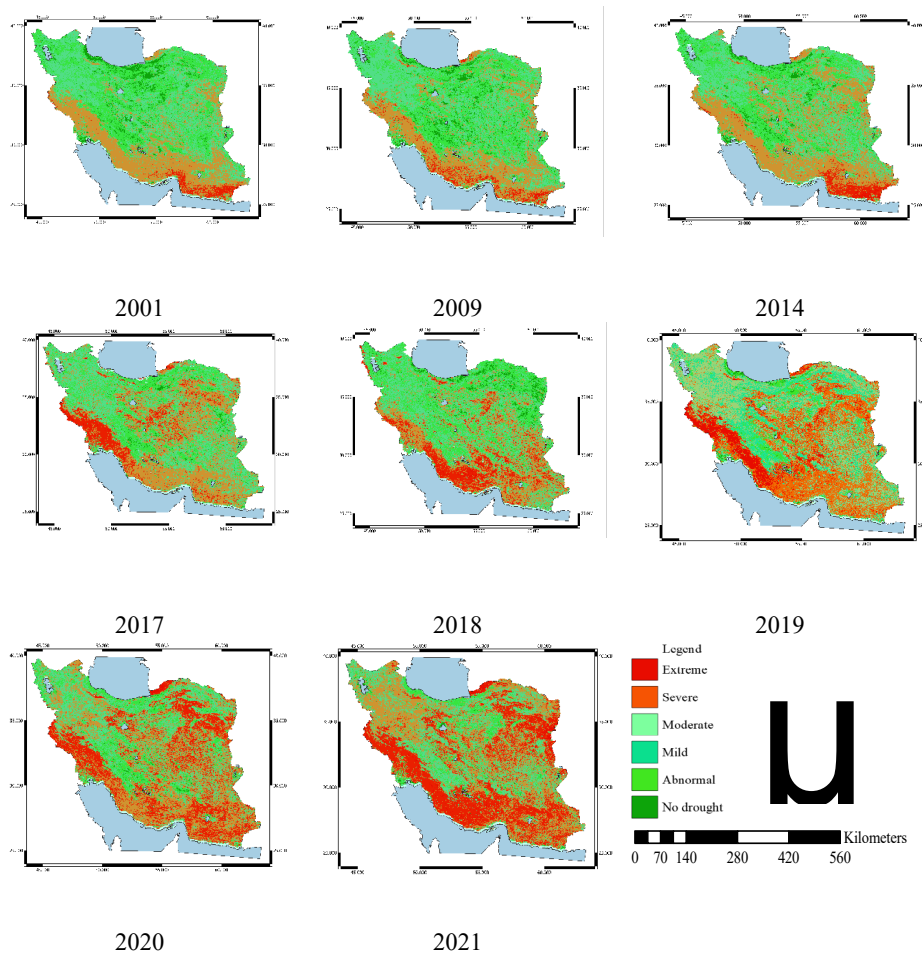
در پژوهشی (et al., 2016) Gidey و همکاران (2018) نشان دادند نظارت شاخص NDVI در بازه زمانی طولانی مدت و بهره‌گیری از مقادیر VCI و TCI می‌تواند پیش‌بینی خشکسالی را بهبود بخشد. به‌طور کلی شاخص VCI شاخص بهتری نسبت به NDVI برای نظارت بر خشکسالی است زیرا شادابی پوشش گیاهی را نسبت به بهترین و بدترین شرایط در طول فصل‌های مشابه و در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این‌که VCI یک شاخص خشکسالی قابل‌اعتماد در مناطق وسیع است بنابراین از این شاخص می‌توان برای تمرکز بر ارزیابی خشکسالی استفاده کرد. در ادامه به بررسی خشکسالی بر اساس شاخص TCI پرداخته شد. بررسی کلاس‌های مختلف نشان می‌دهد که این شاخص تنها نواحی دریای خزر را جزء مناطق بدون خشکسالی طبقه‌بندی کرده است. گسترش خشکسالی به تدریج از سال ۲۰۱۴ با پیشروی از مناطق شرقی



شکل ۶. خشکسالی بر اساس طبقه‌بندی سری زمانی دمای سطح زمین (TCI)
Fig 6. Investigation of drought based on time series classification of surface temperature (TCI) values in the period of 2001 to 2021

است. بررسی شاخص VHI نشان می‌دهد ۶ استان ناحیه جنوبی کشور، بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی طولانی‌مدت را تجربه کرده‌اند. در پژوهشی Golian و همکاران (۲۰۱۵) بررسی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج حاصل حاکی از آن است که تقریباً در همه مناطق ایران خشکسالی‌های شدید بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ رخ داده است. در پژوهشی دیگر با استفاده از شاخص بارش (SPI) در ایستگاه سینوپتیک ارومیه پژوهشگران دریافتند در طول دوره آماری تحقیق در هر یک از دوره بازگشت‌های ۲۲ گانه خشکسالی شدید رخ داده است (Khalili et al., 2007). بررسی فراوانی خشکسالی می‌تواند در توصیف خشکسالی کشاورزی و برنامه‌ریزی بهتر در مقابله با خشکسالی از اهمیت بالایی برخوردار باشد. در شکل (۸) به بررسی فراوانی مدت و شدت خشکسالی در بازه زمانی سال‌های مورد مطالعه پرداخته شده است.

در ادامه در شکل (۷) به بررسی شاخص VHI پرداخته شد. شاخص VHI می‌تواند برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی استفاده شود. شاخص VHI پارامتر دما و پوشش گیاهی را برای ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی ادغام می‌کند (Kogan, 1995). نقشه کلاس‌بندی خشکسالی نشان می‌دهد بیشترین مساحت کشور در سال ۲۰۲۱ را خشکسالی شدید تشکیل می‌دهد. بیشترین خشکسالی‌ها در نواحی مرکزی، شرقی و جنوب شرقی رخ داده است. روند تغییرات شاخص‌ها نشان می‌دهد نواحی شرق و جنوب شرق و مناطق جنوبی کشور به دلیل نوع پهنه‌بندی اقلیمی در مناطق با خشکسالی بسیار شدید و شدید قرار دارد. نکته‌ی مهم دیگر اینکه مساحت به نسبت مناسبی از کشور تا سال ۲۰۱۴ جزء مناطق بدون خشکسالی قرار گرفته است که به تدریج با کاهش همراه شده و حتی مناطقی که جزء مناطق معتدل و بدون خشکسالی قرار می‌باشند را با تنش و خشکسالی همراه کرده



شکل ۷. خشکسالی براساس طبقه‌بندی سری زمانی مقادیر VHI

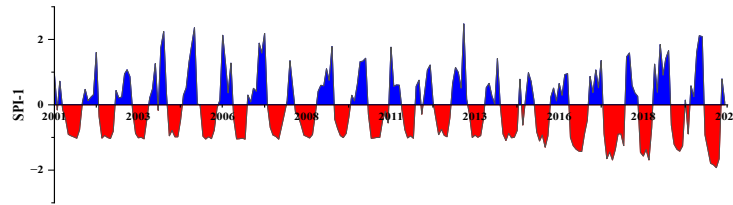
Fig 7. Investigation of drought based on the time series classification of VHI values from 2001 to 2021

در طی سال‌های اخیر نه تنها شیب روند تغییرات با کاهش روبه‌رو نشد بلکه با شدت بیشتری نیز افزایش پیدا کرد به طوری که نسبت مقادیر عددی شاخص SPI-3 در سال ۲۰۲۱ دو برابر مقدار عددی این شاخص در سال ۲۰۱۴ است؛ اما بررسی‌ها و مقایسه کلاس‌های مختلف خشکسالی نشان می‌دهد که شاخص SPI-12 نتایج قابل قبول تری را به منظور بررسی خشکسالی در یک بازه زمانی ۲۰ ساله ارائه داده است. بررسی شاخص SPI-12 نشان می‌دهد که از اواسط سال ۲۰۱۲ به بعد کشور در معرض خشکسالی قرار گرفته و از سال ۲۰۱۷ با افزایش به نسبت قابل ملاحظه‌ای روبه‌رو شده است به طوری که در سال ۲۰۲۱ به بیشترین میزان خود یعنی مقدار عددی ۱/۵۹ رسیده است که به معنی قرارگیری کشور در کلاس خشکسالی شدید و بسیار شدید است. از طرفی بررسی نمودار مساحت کلاس‌های مختلف

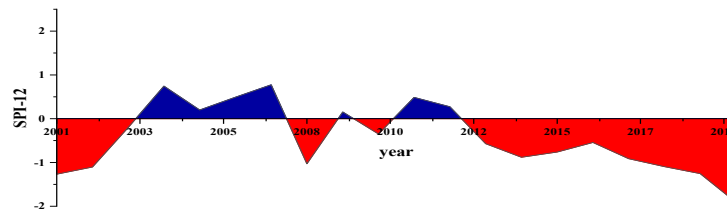
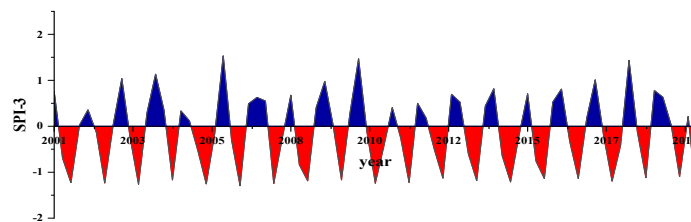
بر اساس نتایج حاصل، شاخص SPI-1 روند نوسانی ترسالی را در ماه‌های با بارش به نسبت مناسب نشان می‌دهد به طوری که هرچه مقدار بارش افزایشی بوده، شاخص SPI-1 نیز برآورد ترسالی داشته است. در مقابل خشکسالی با یک روند یکنواخت و یکسانی برآورد گردیده است با این تفاوت که پهنه وسیع تری از سال در محدوده خشکسالی قرار دارد. بررسی شاخص SPI-3 نتایج متفاوت تری را به نسبت شاخص SPI-1 ارائه کرده است به طوری که این شاخص در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ در محدوده ترسالی قرار داشته است اما به تدریج با تغییراتی همراه شده است. به طوری که در طول سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ ملاحظه می‌شود که با یک شیب ملایمی از مقدار عددی ترسالی کاسته شده و به محدوده خشکسالی در حد متوسط نزدیک شده است؛ که این زنگ خطری برای افزایش سطح خشکسالی در منطقه می‌باشد.

این کلاس کاسته شده و در مقابل به مساحت کلاسی با خشکسالی شدید افزوده شده است؛ بنابراین استفاده از شاخص SPI به منظور بررسی خشکسالی در مناطقی با وسعت زیاد از دقت قابل قبولی برخوردار است.

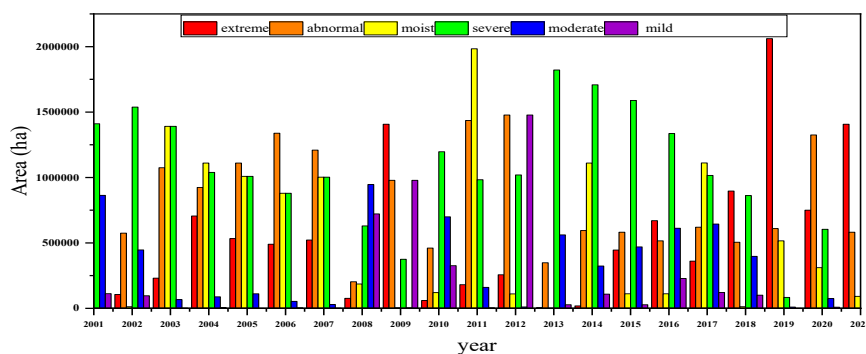
از خشکسالی نیز تا مقدار زیادی به روند تغییرات شاخص SPI-12 نزدیک بوده به طوری که بیشترین مساحت مربوط به کلاس خشکسالی شدید است. از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ به تدریج از مقدار عددی مساحت



a



B



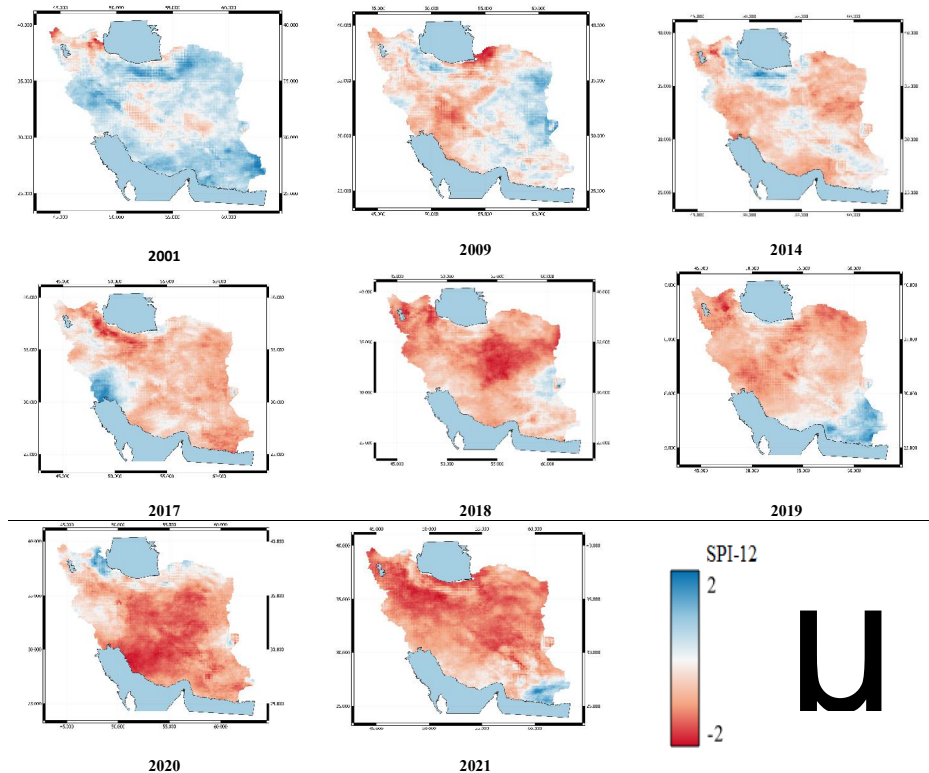
شکل ۸. بررسی فراوانی خشکسالی (a) و مساحت کلاس‌های مختلف در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ در محدوده مورد مطالعه (b)
 Fig 8. a) Examining the frequency of drought (b) The area of different classes during 2001 and 2021

قرار داشته اما به تدریج در طی سال‌های مختلف بر میزان خشکسالی افزوده شده است به طوری که این میزان افزایش در مناطق مرکزی کشور، روند تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. تغییرات SPI-12

بررسی نقشه پراکندگی شاخص SPI-12 نیز نشان می‌دهد که میزان خشکسالی در بازه زمانی مورد بررسی، روند افزایشی داشته، به طوری که در سال ۲۰۰۱ بخش وسیعی از کشور در محدوده ترسالی

و شمال غرب و پهنه دریای خزر را نیز در بر گرفته است.

نشان می‌دهد که میزان تغییرات در سال‌های اخیر به خصوص در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ بیشتر شده به طوری که علاوه بر نواحی مرکزی، نواحی غرب



شکل ۹. نقشه پراکندگی مکانی شاخص SPI-12
Fig 9. Spatial distribution map of SPI-12 index

مانند SPI-1، SPI-3، SPI-12، VCI، TCI و VHI، وضعیت خشکسالی و تغییرات آن در طول سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، خشکسالی در کشور در حال افزایش است و مساحت مناطقی که در کلاس خشکی شدید قرار دارند نیز در این دوره زمانی افزایش یافته است. بررسی تفاوت بین شاخص‌های VCI و TCI نشان می‌دهد که شاخص VCI به‌طور کلی تمایل بیشتری به تشخیص خشکسالی دارد و بیشترین سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار دارند را برآورد می‌نماید. استفاده از شاخص SPI-12 برای بررسی خشکسالی در یک بازه زمانی ۲۰ ساله پیشنهاد می‌شود زیرا نتایج آن نسبت به سایر شاخص‌ها قابل قبول‌تر است و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای پایش و برنامه‌ریزی در مقابل خشکسالی استفاده شود.

نتیجه‌گیری

خشکسالی می‌تواند خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی را به وجود آورد. ایران هر ساله اثرات اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را بر اثر خشکسالی تجربه می‌کند. بنابراین پایش خشکسالی و بررسی شاخص‌های مختلف خشکسالی به‌منظور جلوگیری از گسترش و وقوع احتمالی رویدادهای خشکسالی شدید در آینده امری ضروری تلقی می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نواحی جنوب شرقی و مرکزی کشور در برابر کمبود بارندگی و خشکسالی بیشتر در معرض خطر قرار دارند. میزان بارندگی در این مناطق کمتر از حد نرمال است و ممکن است بر تأمین منابع آبی و مدیریت اجتماعی و اقتصادی تأثیر منفی بگذارد. در مطالعه حاضر، با استفاده از شاخص‌های مختلف

- Carrão, H., Naumann, G. & Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability, *Global Environmental Change*, 39, 108–124.
- Dasari, H. P., V, B. R., Ssvs, R. & Gunta, P. (2017). On the movement of tropical cyclone LEHAR, *Earth Systems and Environment*, 1, 1–14.
- Doughty, R., Xiao, X., Wu, X., Zhang, Y., Bajgain, R., Zhou, Y., Qin, Y., Zou, Z., McCarthy, H. & Friedman, J. (2018). Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010–2016, Oklahoma, USA, *Agricultural Water Management*, 204, 47–59.
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N. R., Saha, S. K. & Siddiqui, A. R. (2015). Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI), *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 53–63.
- Ejaz, N., Bahrawi, J., Alghamdi, K. M., Rahman, K. U. & Shang, S. (2023). Drought Monitoring Using Landsat Derived Indices and Google Earth Engine Platform: A Case Study from Al-Lith Watershed, Kingdom of Saudi Arabia, *Remote Sensing*, 15(4), 984.
- Fang, W., Huang, S., Huang, Q., Huang, G., Wang, H., Leng, G., Wang, L. & Guo, Y. (2019). Probabilistic assessment of remote sensing-based terrestrial vegetation vulnerability to drought stress of the Loess Plateau in China, *Remote Sensing of Environment*, 232, 111290.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L. & Hoell, A. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new
- با توجه به نتایج به دست آمده، توصیه می‌شود که تصمیم‌گیران مربوطه در زمینه مدیریت ریسک خشکسالی و تاب‌آوری، بهره‌برداری پایدار از منابع آبی، توسعه کشاورزی پایدار و اقتصاد سبز اقدامات لازم را انجام دهند. همچنین، این نتایج نیازمند اقدامات فوری بوده و توصیه می‌شود که برنامه‌ها و سیاست‌های مناسب در زمینه مدیریت منابع آب، بهبود کارایی آبیاری، ترویج روش‌های کشاورزی پایدار، و تأمین منابع آب جایگزین برنامه‌های مصرف آب غیرپایدار و توسعه تکنولوژی‌های مرتبط با مدیریت خشکسالی باشد. همچنین، این پژوهش نشان می‌دهد که لازم است سیستم‌های زمانبندی و هشداردهی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های خشکسالی توسعه داده شود تا بتوان به طور دقیق‌تر و به موقع اقدامات مرتبط با خشکسالی را در نظر گرفت. در نهایت، برای تحقیقات آتی در این زمینه توصیه می‌شود که از داده‌های جدیدتر و دقیق‌تر ماهواره‌ای، مدل‌های پیشرفته‌تر تحلیل خشکسالی و به‌روزرسانی داده‌های آماری استفاده شود تا بتوان به تحلیل دقیق‌تر و پایدارتری از خشکسالی در ایران دست یافت.
- منابع**
- Alahacoon, N., Edirisinghe, M. & Ranagalage, M. (2021). Satellite-based meteorological and agricultural drought monitoring for agricultural sustainability in Sri Lanka, *Sustainability*, 13(6), 3427.
- Bayissa, Y. A., Tadesse, T., Svoboda, M., Wardlow, B., Poulsen, C., Swigart, J. & Van Andel, S. J. (2019). Developing a satellite-based combined drought indicator to monitor agricultural drought: A case study for Ethiopia, *GIScience & Remote Sensing*, 56(5), 718–748.
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R. & Ilyushchenko, S. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping, *Scientific Data*, 9(1), 251.

- Khalili, N., Mosaedi, A. & Latifi, N. (2007). Investigation of drought and its occurrence trend in Urmia, *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(5), 156-146. [In Persian]
- Kogan, F. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(48), 557-563.
- Kogan, F., Guo, W., Strashnaia, A., Kleshenko, A., Chub, O. & Virchenko, O. (2016). Modelling and prediction of crop losses from NOAA polar-orbiting operational satellites, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 886-900.
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas, *International Journal of Remote Sensing*, 11(8), 1405-1419.
- Kogan, F. N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1949-1964.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection, *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Liu, Q., Zhang, J., Zhang, H., Yao, F., Bai, Y., Zhang, S., Meng, X. & Liu, Q. (2021). Evaluating the performance of eight drought indices for capturing soil moisture dynamics in various vegetation regions over China, *Science of the Total Environment*, 789, 147803.
- Lloyd-Hughes, B. & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13), 1571-1592.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- environmental record for monitoring extremes, *Scientific Data*, 2(1), 1-21.
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebege, R., Segosebe, E. & Zenebe, A. (2018). Analysis of the long-term agricultural drought onset, cessation, duration, frequency, severity and spatial extent using Vegetation Health Index (VHI) in Raya and its environs, Northern Ethiopia, *Environmental Systems Research*, 7, 1-18.
- Golian, S., Mazdiyasi, O. & AghaKouchak, A. (2015). Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 679-688.
- Iranian Ministry of Energy (2018). *Annual water resources report*, IME publication. [In Persian]
- Jafari, S. M., Nikoo, M. R., Dehghani, M. & Alijanian, M. (2020). Evaluation of two satellite-based products against ground-based observation for drought analysis in the southern part of Iran, *Natural Hazards*, 102, 1249-1267.
- Jalayer, S., Sharifi, A., Abbasi-Moghadam, D., Tariq, A. & Qin, S. (2022). Modeling and predicting land use land cover spatiotemporal changes: A case study in chalus watershed, Iran, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 5496-5513.
- Ji, T., Li, G., Yang, H., Liu, R. & He, T. (2018). Comprehensive drought index as an indicator for use in drought monitoring integrating multi-source remote sensing data: a case study covering the Sichuan-Chongqing region, *International Journal of Remote Sensing*, 39(3), 786-809.
- Kaboli, S., Hekmatzadeh, A. A., Darabi, H. & Haghghi, A. T. (2021). Variation in physical characteristics of rainfall in Iran, determined using daily rainfall concentration index and monthly rainfall percentage index, *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 507-520.

- akis, K. (2006). Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years, *Geocarto International*, 21(4), 21–28.
- Sivakumar, M. (2021). Climate change, agriculture adaptation, and sustainability, *Climate Resilience and Environmental Sustainability Approaches: Global Lessons and Local Challenges*, 87–109.
- Souza, A. G. S. S., Neto, A. R. & de Souza, L. L. (2021). Soil moisture-based index for agricultural drought assessment: SMADI application in Pernambuco State-Brazil, *Remote Sensing of Environment*, 252, 112124.
- Tucker, C. J. & Choudhury, B. J. (1987). Satellite remote sensing of drought conditions, *Remote Sensing of Environment*, 23(2), 243–251.
- Wang, L., Chen, W., Fu, Q., Huang, G., Wang, Q., Chotamonsak, C. & Limsakul, A. (2022). Super droughts over East Asia since 1960 under the impacts of global warming and decadal variability, *International Journal of Climatology*, 42(9), 4508–4521.
- Wassie, S. B., Mengistu, D. A. & Birlie, A. B. (2022). Agricultural drought assessment and monitoring using MODIS-based multiple indices: the case of North Wollo, Ethiopia, *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(11), 787.
- Won, J., Choi, J., Lee, O. & Kim, S. (2020). Copula-based Joint Drought Index using SPI and EDDI and its application to climate change, *Science of the Total Environment*, 744, 140701.
- Xu, H., Wang, X. & Zhao, C. (2021). Drought sensitivity of vegetation photosynthesis along the aridity gradient in northern China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102418.
- Zhao, X., Xia, H., Liu, B. & Jiao, W. (2022). Spatiotemporal comparison of drought in Shaanxi–Paredes-Trejo, F. J., Barbosa, H. A. & Kumar, T. V. L. (2017). Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil, *Journal of Arid Environments*, 139, 26–40.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*. Vol. 30, US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Prodhan, F. A., Zhang, J., Yao, F., Shi, L., Pangali Sharma, T. P., Zhang, D., Cao, D., Zheng, M., Ahmed, N., & Mohana, H. P. (2021). Deep learning for monitoring agricultural drought in South Asia using remote sensing data, *Remote Sensing*, 13(9), 1715.
- Qin, Q., Wu, Z., Zhang, T., Sagan, V., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, C., Ren, H., Sun, Y. & Xu, W. (2021). Optical and thermal remote sensing for monitoring agricultural drought, *Remote Sensing*, 13(24), 5092.
- Rahaman, S. A. & Venkatesh, R. (2020). Application of remote sensing and google earth engine for monitoring environmental degradation in the Nilgiri biosphere reserve and its ecosystem of Western Ghats, India, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 933–940.
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M. & Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 112, 409–418.
- Shahabfar, A. & Eitzinger, J. (2013). Spatio-temporal analysis of droughts in semi-arid regions by using meteorological drought indices, *Atmosphere*, 4(2), 94–112.
- Sharifi, A., Mahdipour, H., Moradi, E. & Tariq, A. (2022). Agricultural field extraction with deep learning algorithm and satellite imagery, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1–7.
- Silleos, N. G., Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z. & Per-

Gansu–Ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in google earth engine, *Remote Sensing*, 14(7), 1570.

Zhou, X., Wang, P., Tansey, K., Zhang, S., Li, H. & Wang, L. (2020). Developing a fused vegetation temperature condition index for drought monitoring at field scales using Sentinel-2 and MODIS imagery, *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105144.



Determining the Water Requirement of Tehran Pine and Chinaberry at Various Vegetative Ages under Drought Stress Conditions

Mohammad Asgari¹, Vahid Etemad², Khaled Ahmadaali³, Ehsan Abdi², Salman Zare³, Mohsen JavanmiriPour^{4*}

1. Late PhD Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Associate Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding Author: Mjavanmiri@ut.ac.ir

Keywords:

Microlysimeter, Plant coefficient, Potential evapotranspiration, Reference evapotranspiration.

Extended abstract

Introduction

It is necessary to carefully select appropriate tree and shrub species to develop urban green spaces and plantations to ensure sustainability. This is particularly important in arid and semi-arid regions, where using drought-resistant species is crucial for successfully developing green spaces.

Material and Methods

An experiment was conducted in the Robat-Karim region of Tehran province to determine the water requirements of Tehran pine and Chinaberry at different vegetative ages under drought stress. The experiment followed a factorial arrangement based on a complete randomized block design with 10 replications. The experimental treatments included species type (pine and olive), age (one, three, and five years old), and drought stress at three levels (mild (0.3), medium (0.5), and high (0.7)). This study was conducted to achieve the following objectives: determine the water requirement of species, determine the plant factor, and investigate the effect of drought stress on water requirement and plant factor. The research consisted of several phases, including moisture monitoring at drought stress levels, measuring the water requirements of species, calculating reference evaporation and transpiration, determining vegetation coefficients, and evaluating the effects of different drought stresses on water requirements and vegetation coefficients.

Results and Discussion

The study found that *Eldarica* pine seedlings consumed 239.3, 258.3, 307.13, 310.4, 339.7, 385.13, 414.03, and 498.4 mm of water during the plant growth period in different treatments, including drought stress treatments of 0.3, 0.5, and 0.7 at age 1, drought 0.3, 0.5, and 0.7 at age 3, and drought 0.3, 0.5, and 0.7 at age 5. Similarly,

Received:

23 December 2023

Revised:

13 January 2024

Accepted:

13 January 2024

How to cite this article:

Asgari, M., Etemad, V., Ahmadali, K., Abdi, E., Zare, S., & JavanmiriPour, M. (2024). Determining the Water Requirement of Tehran Pine and Chinaberry at Various Vegetative Ages under Drought Stress Conditions. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 59-76. [10.22077/JDCR.2024.7076.1056](https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.7076.1056)



the amount of water consumed in Chinaberry seedlings during the growth period of the plant and in different treatments applied is equal to 238.9, 282.4, 310.03, 322, 374.8, 421.4, 471.7, 374.8, and 421.4 mm, respectively. Generally, water loss from plants, such as evaporation and transpiration in Tehran pine and Chinaberry species, is determined by plant and environmental factors. The effect of environmental factors on evaporation and transpiration is called atmospheric demand. The higher the atmospheric demand, the faster the water can evaporate from a free surface. The factors of solar radiation, temperature, relative humidity, and wind are the most important factors that affect the atmospheric demand. Approximately 1 to 5% of the amount of radiation absorbed by the leaf is used for photosynthesis, and about 75 to 85% of it is used for heating the leaf and transpiration. An increase in solar radiation causes an increase in atmospheric demand. It seems that the higher plant coefficient is due to the difference in the ecological needs of Chinaberry compared to Tehran Pine. This tree requires sunny places and rich, deep, cool, and drained soils, but it can grow in all kinds of soils; it is resistant to drought; it can tolerate frost; and it shows some resistance to soil salinity. One of the reasons for the higher water requirement of Tehran pine compared to Chinaberry is the difference in leaf morphology. Tehran pine needs more water than Chinaberry due to having a large number of double and long needles with a length of 8–15 cm in its crown.

Conclusion

The results showed that the water requirement of the Tehran pine species is higher than that of the Chinaberry in the studied moisture regimes. Furthermore, as the allowed moisture reduction increased, the water requirement of both Tehran pine and Chinaberry increased in all the studied ages. Therefore, it is necessary to consider appropriate drought stress points (0.7) in afforestation plans in arid and semi-arid areas to provide suitable conditions for growth and survival in harsh conditions.



تعیین نیاز آبی گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در سنین مختلف رویشی تحت شرایط تنش خشکی

محمد عسگری^۱، وحید اعتماد^۲، خالد احمدآلی^۳، احسان عبدی^۴، سلمان زارع^۳، محسن جوانمیری پور^{۴*}

۱. دانشجوی فقیذ دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳. استادیار، گروه احیا و مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۴. دانش آموخته دکتری علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*نویسنده مسئول: Mjavanmiri@ut.ac.ir

چکیده

یکی از عوامل توسعه‌ی فضای سبز شهری، جنگل‌کاری و پایداری آن، انتخاب گونه‌ی درختی و درختچه‌ای مناسب است. بنابراین شناسایی و استفاده از گونه‌های سازگار و مقاوم به خشکی در توسعه‌ی فضای سبز در مناطق خشک و نیمه‌خشک امری ضروری به نظر می‌رسد. به منظور تعیین نیاز آبی گونه‌های کاج و زیتون تلخ در سنین مختلف رویشی تحت تنش خشکی، آزمایش با آرایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوکی تصادفی کامل با تیمارهای آزمایشی شامل نوع گونه در دو سطح (کاج و زیتون)، سن در سه سطح (یک، سه و پنج ساله) و تنش خشکی در سه سطح (ملایم (۰/۳)، متوسط (۰/۵) و زیاد (۰/۷)) در ۱۰ تکرار در منطقه رباط کریم، استان تهران انجام شد. نتایج نشان داد که میزان مصرف آب در نهال کاج تهران در طول دوره رشد گیاه و در تیمارهای مختلف اعمال شده شامل تیمارهای تنش خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در سن ۱؛ خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در سن ۳؛ خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در سن ۵ به ترتیب شامل ۲۳۹/۳، ۲۵۸/۳، ۳۰۷/۱۳، ۳۱۰/۴، ۳۳۹/۷، ۳۸۵/۱۳، ۴۱۴/۰۳، ۴۳۶/۷ و ۴۹۸/۴ میلی‌متر بود. همچنین میزان مصرف آب در نهال زیتون تلخ در طول دوره رشد گیاه و در تیمارهای مختلف اعمال شده به ترتیب برابر با ۲۳۸/۹، ۲۸۲/۴، ۳۱۰/۰۳، ۳۲۲، ۳۷۴/۸، ۴۲۱/۴، ۴۷۱/۷، ۳۷۴/۸ و ۴۲۱/۴ میلی‌متر بدست آمد. بر اساس نتایج مقدار نیاز آبی گونه کاج تهران در رژیم‌های رطوبتی مورد مطالعه از گونه زیتون تلخ بیشتر است. با افزایش میزان کاهش رطوبت مجاز مقدار نیاز آبی گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در همه سنین مورد بررسی، افزایش یافت. بنابراین نیاز است در طرح‌های جنگل‌کاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک گونه زیتون تلخ در اولویت کاشت قرار گیرد و نکات تنش خشکی مناسب (۰/۷) در نظر گرفته شود تا شرایط مناسب برای رشد و ماندگاری در شرایط سخت برای این درختان فراهم گردد

واژه‌های کلیدی:

تبخیر تفرق پتانسیل، تبخیر تفرق مرجع، ضرب گیاهی، میکرو لایسیمتر.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۰/۰۲

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۰/۲۳

مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های حال و آینده در ایران مسئله کم آبی و در مواردی بحران کم آبی است (Karmi and Ghaffarian Behrman, 2017). نتایج پژوهش‌هایی که روند بلندمدت تغییرات دما و بارش در نقاط مختلف ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند، دلالت بر تغییرات مقدار بارش و گرم شدن فلات ایران دارند (Nowrozi Haroni and Tabari Khokhsa-rai, 2015). حدود ۸۵ درصد از بخش‌های کشور در اقلیم‌های خشک (۳۰٪)، نیمه‌خشک (۲۰٪) و فراخشک (۳۵٪) قرار دارند (Zahedi Amiri and Zargham, 2015). ایران به‌عنوان کشوری با تنش‌های آبی فراوان و واقع شدن در منطقه بحرانی خاورمیانه، با دورنمایی نگران‌کننده مواجه است که در صورت نبود مدیریت صحیح و تنظیم سیاست‌های داخلی و بین‌المللی مطلوب برای آینده، با بحران‌های زیست‌محیطی، سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و حتی نظامی-امنیتی در داخل و خارج از مرزهای سیاسی مواجه خواهد شد. ابعاد و پیامدهای این بحران می‌تواند استقلال و تمامیت ارضی کشور را به چالش بکشد (Rezayan and Rezayan, 2016).

شرایط خاص اقلیمی کشور که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی واقعیت‌گریزناپذیر آن است، هرگونه تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع آب محدود کشور کرده است (Heydari, 2006). انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب با وضعیت منابع آب موجود در منطقه و سازگار شرایط اقلیمی و زیستی یک ناحیه جهت بازده گیاه، پایداری محیط، صرفه‌های اقتصادی، کاهش مخاطرات و جنبه‌های زیبایی‌شناختی، کاملاً منطقی و واقع‌گرایانه است؛ لذا باید گونه‌هایی را انتخاب نمود که بیشترین سازگاری را با شرایط مشروح داشته باشند تا هزینه‌های نگهداری و مواظبت از آن بر دوش مدیریت شهری سنگینی نکند (Salimi Soban et al., 2018). یکی از عوامل توسعه‌ی فضای سبز شهری، جنگل‌کاری و پایداری آن، انتخاب گونه‌ی درختی و درختچه‌ای مناسب و بالا بردن تنوع گونه‌ای در این فضاها است. بنابراین شناسایی و استفاده از گونه‌های

سازگار و مقاوم به خشکی در توسعه‌ی فضای سبز در مناطق خشک و نیمه‌خشک امری ضروری به نظر می‌رسد (Asgari et al., 2022).

یکی از محدودیت‌های اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تخصیص منابع آبی برای توسعه‌ی فضای سبز شامل فضای سبز عمومی و غیر عمومی، پارک‌ها و بوستان‌های جنگلی و غیر جنگلی، جنگلکاری‌ها و کمربندهای سبز است (Bamanian et al., 2008). زیرا در این مناطق منابع آب محدود بوده و تخصیص آب به فضای سبز در رقابت شدیدی با سایر موارد مصرف کشاورزی، صنعت و حتی آب شرب می‌باشد. بنابراین، آب تخصیص یافته به عرصه مورد نظر جهت ایجاد پوشش گیاهی دارای ارزش زیادی بوده و باید به‌صورت بهینه و با راندمان بالا مورد مصرف قرار گیرد (Zehtabian and Farshi, 2008). به همین علت با تعیین دقیق نیاز آبی گیاهان می‌توان برنامه آبیاری را به درستی تنظیم نمود و مقدار آب بهینه را در اختیار گیاه قرار داد و از مشکلات ناشی از آبیاری کم آبیاری جلوگیری کرد (Alihoury et al., 2015). علاوه بر این، امکان طراحی دقیق شبکه‌های آبیاری فضای سبز و ایستگاه‌های پمپاژ مربوطه فراهم می‌گردد و از صرف هزینه‌های گزاف بهره‌برداری و نگهداری ناشی از طراحی نادرست این سیستم‌ها جلوگیری خواهد شد. یکی از اقدامات بسیار مهم در توسعه‌ی فضای سبز در گام اول تعیین دقیق نیاز آبی و ضریب گیاهی گونه‌های فضای سبز و در گام دوم بررسی دقیق توان مقاومتی گونه‌های درختی در برابر تنش‌های محیطی و بطور ویژه استقامت در برابر کمبود آب می‌باشد (Bostani and Ansari, 2011).

تنش آبی در مراحل مختلف رشد گیاه از جمله کند شدن فرایندهای رویشی نظیر جوانه‌زنی (Vaezirad et al., 2008)، افزایش رشد و گسترش سیستم توسعه ریشه (Jaziraei, 2011)، افزایش نسبت ریشه به شاخه و برگ گیاهان (Asgari et al., 2022؛ Jaziraei, 2011)، کاهش شاخص سطح برگ (Bakhshi khaniki et al., 2011)، کاهش میزان تعرق (Ahmadede et al., 2016)، افزایش کرک‌های اپیدرمی و مقاومت کوتیکولی (An-saryan Mahabadi et al., 2019) اثرگذار است. اساساً

دارد به طوری که ضریب همبستگی در تبخیر تعرق برای سال اول و دوم به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۸۷ و در مجموع دو سال ۰/۸۲ و برای ضریب گیاهی این مقدار به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۶۲ و در مجموع دو سال ۰/۸۶ بود (Jafari et al., 2016).

اندازه‌گیری تبخیر تعرق و ضریب گیاهی پسته با استفاده از لایسیمتر بتنی زهکش‌دار در رفسنجان انجام شد. نتایج نشان داد که تبخیر تعرق نهال پسته در چهار، پنج، شش، هفت، هشت و نه سالگی به ترتیب ۲۲۹۱/۲، ۲۵۰۷/۸، ۲۷۳۹/۴، ۴۵۱۶، ۴۶۰۴ و ۵۶۲۱ مترمکعب در هکتار با مقادیر متوسط ضریب گیاهی برابر با ۰/۱۰۸، ۰/۱۰۴، ۰/۱۱۵، ۰/۲۱، ۰/۲۸ و ۰/۳۳ به دست آمد. در این تحقیق مقدار متوسط ضریب گیاهی در مراحل پنج‌گانه رشد پسته به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۲۲، ۰/۱۶ و ۰/۱۹ محاسبه شد (Moazenpour et al., 2017).

در مطالعه‌ای به تعیین ضریب گیاهی ارغوان (*Cercis siliquastrum* L) در خاک و سطوح مختلف آبیاری در شرایط اقلیمی کرج پرداخته شد. نتایج نشان داد که میانگین تبخیر تعرق پتانسیل ۱۰ روزه در حدهای مجاز تقلیل رطوبت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در بافت لوم‌شنی به ترتیب برابر ۱۵/۵۶، ۱۴/۸۶ و ۱۴/۲۴ میلی‌متر و در بافت لوم‌رسی به ترتیب برابر با ۲۱/۵۷، ۱۹/۰۲ و ۱۸/۰۶ میلی‌متر می‌باشد. مجموع نیاز آبی خالص ارغوان در بافت لوم‌رسی برای حدهای مجاز تقلیل رطوبت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر ۴۳۷/۴۷، ۳۵۷/۹۲ و ۴۱۵/۳۸ میلی‌متر و در خاک لوم‌شنی برابر با ۳۲۷/۵۹ و ۳۴۱/۸۵ میلی‌متر به دست آمد. همچنین مقدار متوسط ضریب گیاهی ارغوان طی دوره رشد در بافت‌های لوم‌رسی به ازای حدهای مجاز تقلیل رطوبت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب با ۰/۳۶، ۰/۳۲ و ۰/۳۱ و برای خاک لوم‌شنی با ۰/۲۷، ۰/۲۶ و ۰/۲۴ برابر است (Rahimi et al., 2020).

در مطالعه‌ای بررسی الزامات آبیاری برای درختان خرما و آبیاری نخلستان‌ها در عربستان سعودی مورد توجه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که متوسط ضریب گیاهی برای چرخه تولید درخت خرما در طول سال ۰/۶۳ بود (Kassem, 2007).

راه‌های تشخیص تنش آبی و کم‌آبی در گیاه عبارت است از: پژمردگی برگ‌ها، متمایل شدن رنگ گیاه به سبز تیره، لوله شدن برگ‌ها، تغییر در دمای برگ، تغییر در هدایت روزنه‌ای، مقاومت روزنه‌ای و تراوایی غشای برگ (Ansaryan Mahabadi et al., 2019).

نیاز آبی برخی از گونه‌های غالب فضای سبز (زبان‌گنجشک و سرو نقره‌ای) شهر اصفهان با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار در مطالعه‌ای تعیین شد. نتایج نشان داد که میزان تبخیر و تعرق پتانسیل برای دوره هشت‌ماهه فروردین تا آبان برای درخت زبان گنجشک ۹۸۳ میلی‌متر و درخت سرو نقره‌ای ۸۳۷ میلی‌متر است. همچنین متوسط ضریب گیاهی درخت زبان گنجشک برای کل دوره ۰/۴۸، حداکثر آن ۰/۷۷ در مرداد در مرحله بارور شدن گیاه و حداقل آن ۰/۲ در فروردین در مرحله جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه به دست آمد. متوسط ضریب گیاهی درخت سرو نقره‌ای برای کل دوره ۰/۴۳، حداکثر آن ۰/۵۸ در تیر و مرداد در مرحله باروری گیاه و حداقل آن ۰/۳ در مرحله جوانه‌زنی به دست آمد (Hashemi Garmdareh, 2005).

در مطالعه‌ای تحت عنوان تعیین نیاز آبی گونه‌ی نارون (*Ulmus carpinifolia*) و خرزهره (*Nerium oleander*) با استفاده از روش WUCOLS III در فضای سبز شهر شیراز نشان داده شد که بیشترین مقدار تبخیر تعرق مرجع در مرداد با ۸/۲ میلی‌متر در روز و کمترین مقدار تبخیر تعرق مرجع در بهمن با ۲/۲ میلی‌متر در روز می‌باشد، که میانگین کمترین نیاز آبی خرزهره ۱/۵۴ میلی‌متر در روز و درخت نارون با میانگین ۱/۷۶ میلی‌متر در روز در بهمن ماه و بیشترین نیاز آبی خرزهره با میانگین ۶/۳۱۴ میلی‌متر در روز در مرداد ماه و بیشترین نیاز آبی نارون با میانگین ۶/۵۶ میلی‌متر در روز مربوط به مرداد ماه می‌باشد (Shokrallahzadeh et al., 2016).

در پژوهشی تحت عنوان تعیین تبخیر تعرق و ضریب گیاهی زیتون در مراحل مختلف رشد با استفاده از تکنیک سنجش از دور و بیلان رطوبتی در طارم زنجان نشان داده شد که میزان تبخیر تعرق و ضریب گیاهی به دست آمده در روش سنجش از دور در مراحل مختلف رشد زیتون، تطابق مناسبی با داده‌های بیلان رطوبتی

ایجاد کمربندها و کمان‌های سبز و فضای سبز شهری بسیار لازم و ضروری می‌باشد. این پژوهش با توجه به اهداف مختلفی شامل تعیین برنامه‌ریزی آبیاری، پایش رطوبت در سطوح تنش خشکی و اندازه‌گیری نیاز آبی (ETc) گونه‌ها و محاسبه تبخیر و تعرق مرجع و ضریب گیاهی صورت گرفته است.

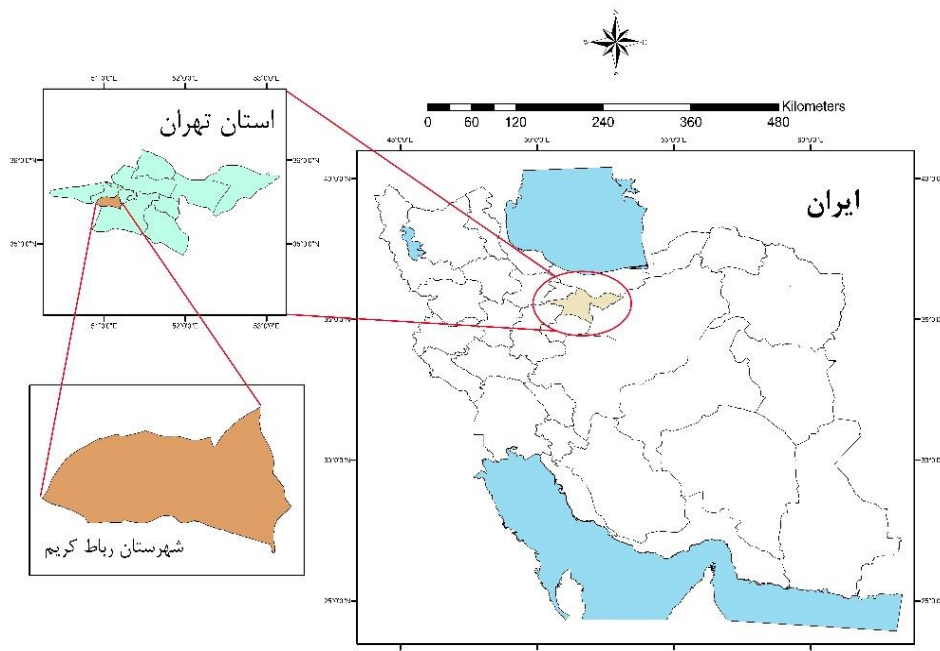
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان رباط کریم در جنوب غربی استان تهران واقع شده و با وسعتی معادل ۲۷۵ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۵۱°۴' و عرض جغرافیایی ۳۵°۲۸' قرار گرفته است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۰۵۰ متر می‌باشد و از شمال به شهرستان‌های شهریار و کرج (استان البرز)، از جنوب به ری و اسلام‌شهر، از شرق به بهارستان و از غرب به ساوه (استان مرکزی) محدود است.

در پژوهشی به تعیین نیاز آبی گیاهان و برنامه‌های آبیاری برای برخی محصولات عمده در جنوب کشور عراق پرداخته شد. نتایج نشان داد که تبخیر تعرق مرجع در طی روز از ۲/۱۸ تا ۱۰/۵ میلی‌متر در روز و بارندگی مؤثر نیز از ۰ تا ۲۳/۱ میلی‌متر متغیر می‌باشد (Ewaid et al., 2019).

در زمینه برآورد نیاز آبی گیاهان غیر زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک و برنامه‌ریزی آبیاری، پس از بررسی‌های به‌عمل آمده مشخص گردید که مطالعات زیادی در این راستا انجام نشده است و بیشتر تمرکز تحقیقات در معادله با برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی استوار است و به همین دلیل مطالعات انجام شده پاسخگوی نیاز پژوهش در این زمینه نمی‌باشد؛ بنابراین به نظر می‌رسد که انجام مطالعاتی در خصوص تعیین نیاز آبی و دور آبیاری درختان با توجه به اهمیت جنگل‌کاری‌ها در مناطق خشک و



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Fig 1. Geographical location of the study area

درختی یک‌ساله، سه‌ساله و پنج‌ساله)، فاکتور تنش خشکی در سه سطح (۰/۳، ۰/۵، ۰/۷) درصد از حد مجاز تقلیل رطوبت^۱ و فاکتور گیاهی در دو سطح (گونه‌های کاج تهران (*Pinus eldarica* L.) و زیتون تلخ

این مطالعه به صورت فاکتوریل با عامل سنین مختلف گونه‌های درختی و تنش‌های مختلف خشکی در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با ۱۰ تکرار انجام گرفت. فاکتورهای در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل فاکتور سنین مختلف گونه‌های گیاهی (گونه‌های

1. Maximum allowable depletion

میکرو لایسیمتر کوچک، در سن سه در میکرو لایسیمتر متوسط و در سن پنج در میکرو لایسیمتر بزرگ کاشته شدند. ابعاد (قطر×ارتفاع) میکرو لایسیمترهای بزرگ، متوسط و کوچک به ترتیب ۲۶/۵×۳۰، ۲۳×۲۴ و ۱۷/۵×۱۸ سانتی‌متر بود.

پس از کاشت نهال‌ها در میکرو لایسیمتر، به منظور نشست کامل خاک داخل میکرو لایسیمترها و رفع شدن تنش وارده به نهال‌ها، دو نوبت آبیاری سنگین انجام شد. عملیات کاشت نهال‌ها در بهمن ماه ۱۳۹۹ انجام گردید. پس از آبیاری نهال‌های کاشت شده حدود ۲۴ الی ۷۲ ساعت بعد رطوبت به حد ظرفیت زراعی رسیده و پایش رطوبت با گذشت زمان از نقطه ظرفیت زراعی، ابتدا به صورت روزانه و سپس با کم شدن رطوبت به صورت روزی دو بار انجام شد. پایش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه هم با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج TDR مدل HH2 (برای تعیین زمان رسیدن به رطوبتی که باید آبیاری صورت گیرد)، و هم از روش وزنی (برای تعیین دقیق مقدار کمبود رطوبتی) انجام گردید.

(*Melia azaderach L.*)؛ (یک گونه سوزنی برگ و یک گونه پهن برگ) و هر کدام در ده تکرار است که در مجموع ۱۸۰ تیمار حاصل می‌گردد. از تعداد ۱۸۰ تکرار، ۹۰ تکرار مربوط به کاج تهران است که از ۹۰ اصله نهال کاج تهران، تعداد ۳۰ نهال یک ساله، ۳۰ نهال سه ساله و ۳۰ نهال پنج ساله می‌باشد و از ۹۰ اصله نهال زیتون تلخ، تعداد ۳۰ نهال یک ساله، ۳۰ نهال سه ساله و ۳۰ نهال پنج ساله می‌باشد. در این مطالعه بافت خاک لومی ماسه‌ای بود. حد مجاز تقلیل رطوبت درصدی از آب قابل استفاده در خاک می‌باشد که بین دو راندمان آبیاری، گیاه بدون آنکه صدمه‌ای ببیند از خاک دریافت می‌کند و معمولاً آن را به صورت درصدی از ظرفیت آب قابل استفاده در منطقه ریشه بیان می‌کنند (Alizadeh, 2014).

با توجه به حداکثر عمق ریشه نهال‌های مختلف یک، سه و پنج ساله کاج تهران و زیتون تلخ، کاشت نهال‌ها در میکرو لایسیمترهایی به قطر و ارتفاع متناسب با نوع گونه و سن آن‌ها انجام شد. بدین صورت که گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در سن یک در



شکل ۲. تصاویری از لایسیمترها و نهال‌های کشت شده و پایش رطوبت در آن‌ها با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج HH2
Fig 2. Images of lysimeters and cultivated seedlings and moisture monitoring in them using a TDR moisture meter.

مورد نظر یعنی درصدهای ذکر شده تخلیه مجاز رطوبتی، برنامه‌ریزی آبیاری برای هر یک از تیمارها تهیه گردید و آبیاری و جبران کمبود رطوبتی بر اساس آن انجام گرفت.

پس از اندازه‌گیری نقاط رطوبتی ظرفیت زراعی^۱ و نقطه پژمردگی^۲ و لحاظ نمودن سطوح تنش خشکی

1. Field capacity
2. Wilting point

و دارای رشد فعال با پوشش کامل زمین، سایه‌انداز و نیز بدون تنش آبی است (Allan et al., 1998). معمولاً در شرایط آزمایشی از گیاه چمن استفاده می‌گردد. از میان مدل‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش فائو پنمن-مانتیث (PMF-56) که هم بیلان انرژی و هم تئوری آئرودینامیکی را در مدل در نظر گرفته به عنوان مناسب‌ترین مدل در برآورد تبخیر و تعرق مرجع شناخته شده و توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در همه‌ی اقلیم‌ها توصیه شده است (Xu et al., 2006). لذا در این مطالعه تبخیر و تعرق مرجع از روش PMF-56 (رابطه ۳) و با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی شهر رباط کریم محاسبه گردید:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

که در آن (Z) ارتفاع از سطح دریا، حداکثر دمای هوا طی شبانه‌روز (T_{max}) درجه سانتی‌گراد، حداقل دمای هوا طی شبانه‌روز (T_{min}) درجه سانتی‌گراد، میانگین دمای هوا (T_{mean}) درجه سانتی‌گراد، تشعشع فوق‌اراضی (R_a) مگاژول بر متر مربع بر روز، a_a و b_a به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵، ضریب آلبیدوی (α) گیاه مرجع ۰/۲۳، فشار اتمسفر در محل (کیلوپاسکال)، δ ثابت استفان بولتزمن ($4.903 \times 10^{-9} \text{ Mjk}^4 \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، فشار بخار واقعی (e_a) کیلوپاسکال، n در روز، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (U_2) متر بر ثانیه، پارامترهای تشعشع خالص در سطح گیاه (R_n)، فلاکس حرارتی خاک (G)، میانگین دمای روزانه در ارتفاع ۲ متری (T)، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (U_2)، فشار بخار اشباع در دمای حداکثر و حداقل (T_{max}) و (T_{min}) e° بر حسب کیلوپاسکال، فشار بخار اشباع (e_s)، فشار بخار واقعی (e_a)، شیب معادله‌ی فشار بخار اشباع و دما (Δ)، ثابت سایکرومتری (γ) بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد و (ET_0) تبخیر و تعرق گیاه مرجع است. محاسبات نیاز آبی گیاه مرجع با استفاده نرم افزار ET0 calculator محاسبه شد. اطلاعات جمع‌آوری شده در نرم‌افزار اکسل (Excel) ذخیره شده و با استفاده از نرم‌افزارهای آماری موجود SPSS و R پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها (روش آزمون کولموگورف-

با اعمال برنامه‌ریزی آبیاری و پایش و اندازه‌گیری رطوبت و وزن میکروولایسیمترها در بازه زمانی تعیین شده برای تیمارهای مورد نظر، مقدار تبخیر تعرق گیاه (ET_c) با استفاده از داده‌های به دست آمده از روش وزنی و ابعاد میکروولایسیمتر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Rahimi, 2019).

$$ET_c = \frac{W_2 - W_1}{A} \quad (1)$$

که در آن تبخیر تعرق واقعی (پتانسیل) گیاه، A مساحت میکروولایسیمتر و W_1 و W_2 به ترتیب مقدار وزن مجموعه میکروولایسیمتر قبل و بعد از آبیاری است. آب مورد نیاز گیاه به مجموع آب تعرق یافته در دوره رشد، آب نگهداری شده در بافت گیاهی و رطوبت تبخیر شده از سطح خاک و گیاه اطلاق شده و بر حسب میلی‌متر برای دوره معینی بیان می‌گردد (Ahmadaali et al., 2021). در صورت داشتن ضریب گیاهی و تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0)، تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه (ET_c) از رابطه (۲) محاسبه گردید (Allan et al., 1998):

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

از آنجایی که برای اکثر گونه‌های گیاهی فضای سبز و عرصه‌های جنگل کاری ضریب گیاهی مشخص نیست لذا در این تحقیق ضریب گیاهی کاج تهران و زیتون تلخ جزء مجهولات است و باید تعیین شود. K_c نشان‌دهنده یکپارچگی اثر ارتفاع گیاه، مقاومت گیاه - خاک و ضریب بازتاب سطح است که با استفاده از تعریف ET_0 تعیین می‌شود. نسبت شار منعکس شده از یک سطح به شار تابیده شده به آن را ضریب انعکاس می‌گویند. ضریب انعکاس درصد نوری را نشان می‌دهد که از سطح بر می‌گردد. مقدار K_c بستگی به درصد پوشش گیاه، رطوبت خاک و سن گیاه دارد. به همین دلیل با تغییر پارامترهای فوق، ضریب K_c نیز در طول فصل تغییر می‌کند. برای تعیین ضریب گیاهی با اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی در طول دوره رشد گیاه، مقدار K_c از رابطه (۴) تعیین گردید. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) نشان‌دهنده‌ی مقدار تبخیر و تعرق نوع معینی از پوشش سبز با ارتفاع ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر است که در سطح گسترده کشت شده

نتایج

تجزیه واریانس عوامل مورد بررسی شامل گونه‌های

اسمیرنوف)، مقایسه میانگین‌ها از روش تجزیه واریانس با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۱ درصد انجام شد.

جدول ۱. آنالیز تجزیه واریانس فاکتورهای مورد بررسی با استفاده از آزمون GLM

Table 1. Variance analysis of the studied factors using the GLM test

انای جزئی مربع Partial Eta Squared	معنی‌داری Sig.	مقدار F	میانگین مربع‌ها Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربع‌ها Type III Sum of Squares	فاکتور Source
.090	.000	8.401	5.170	5	25.850a	مدل تصحیح شده Corrected Model
.413	.000	300.020	184.625	1	184.625	متقابل Intercept
.000	.0738	.112	.069	1	.069	گونه‌ها Species
.005	.0843	1.057	.651	2	1.301	گونه × سال ۱۴۰۰ species * year2021
.055	.000	12.284	7.559	2	15.118	گونه × سال ۱۴۰۱ species * year2022
			.615	426	262.150	خطا Error
				432	2016.000	کل Total
				431	288.000	کل تصحیح شده Corrected Total

آبان به کمترین مقدار رسید. بیشترین میزان تبخیر تعرق زیتون تلخ یک‌ساله مربوط به دهه سوم خرداد و در تنش خشکی ۰/۷ می‌باشد که برابر با ۲۱/۸ میلی‌متر در ده روز است. بیشترین میزان تبخیر تعرق زیتون تلخ سه‌ساله مربوط به دهه سوم خرداد و در تنش خشکی ۰/۷ بود که برابر با ۳۰/۷ میلی‌متر در ده روز است. بیشترین میزان تبخیر تعرق زیتون تلخ پنج‌ساله مربوط به دهه سوم خرداد و در تنش خشکی ۰/۷ بود که برابر با ۳۸/۳۱ میلی‌متر در ده روز است (شکل ۳).

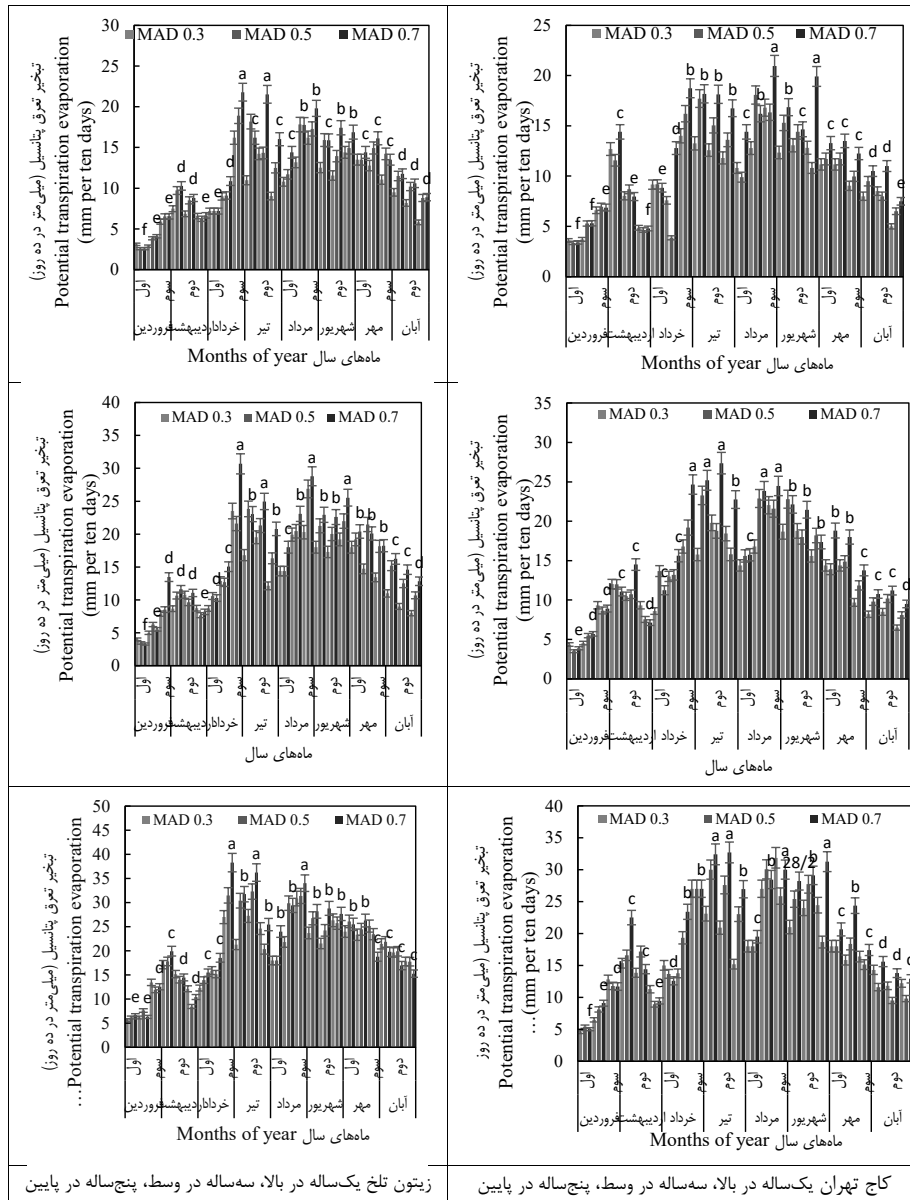
نتایج نشان داد که بیشترین مقدار تبخیر تعرق مرجع مربوط به دهه دوم ماه‌های خرداد و تیر است (۱۲۴/۷ میلی‌متر بر ده روز). کمترین میزان تبخیر تعرق مرجع در دهه دوم آبان اتفاق می‌افتد که مقدار آن ۵۷ میلی‌متر در ده روز می‌باشد (شکل ۴).

بیشترین مقدار ضریب گیاهی کاج تهران یک ساله در تنش خشکی ۰/۷ مربوط به دهه سوم ماه شهریور می‌باشد که مقدار آن برابر با ۰/۲۲ است در حالی که کمترین مقدار آن در دهه دوم اردیبهشت اتفاق می‌افتد

مورد مطالعه، تیمارهای تنش خشکی مورد استفاده و سال‌های انجام مطالعه و نیز تأثیر متقابل آن‌ها نشان دهنده معنی‌دار بودن اختلاف بین میانگین‌ها به احتمال ۹۵٪ است (جدول ۱).

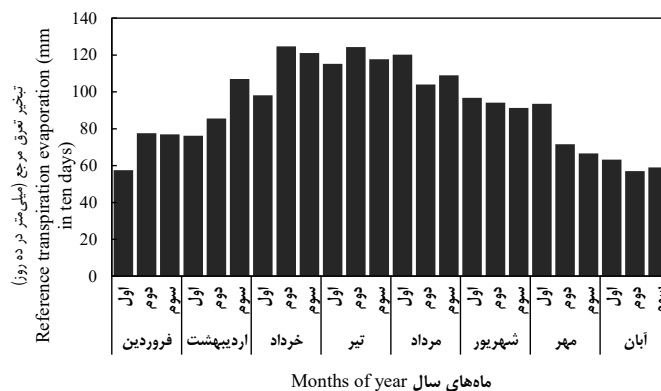
نمودار تبخیر- تعرق برای گونه کاج تهران در تنش‌های خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در ماه‌های خرداد تا مهر دارای بیشترین مقدار بود در حالی که در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و آبان به کمترین مقدار رسید. بیشترین میزان تبخیر تعرق کاج تهران یک‌ساله مربوط به دهه دوم تیر و در تنش خشکی ۰/۷ می‌باشد که برابر با ۲۷/۳۶ میلی‌متر در ده روز است. بیشترین میزان تبخیر تعرق کاج تهران سه‌ساله مربوط به دهه دوم تیر و در تنش خشکی ۰/۷ می‌باشد که برابر با ۲۷/۳۶ میلی‌متر در ده روز است. بیشترین میزان تبخیر تعرق کاج تهران پنج‌ساله مربوط به دهه دوم تیر و در تنش خشکی ۰/۷ می‌باشد که برابر با ۳۲/۷ میلی‌متر در ده روز است (شکل ۳).

تبخیر تعرق زیتون تلخ در تنش‌های خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در ماه‌های خرداد تا مهر دارای بیشترین مقدار بود در حالی که در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و



شکل ۳. تبخیر تعرق پتانسیل (میلی‌متر بر ده روز) گونه‌های کاج تهران (سمت چپ) و زیتون تلخ (سمت راست) در سنین یک، سه و پنج سالگی در بازه زمانی مورد مطالعه

Fig 3. Potential evapotranspiration (mm / ten days) of Tehran pine (left) and Chinaberry (right) at 1, 3 and 5 ages in the studied period



شکل ۴. تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر بر ده روز) در بازه زمانی مورد مطالعه برای گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ

Fig 4. Reference evapotranspiration (mm / ten days) in the studied period

deh و همکاران (2016)، Jafari و همکاران (2016)، Ra-، himi و همکاران (2020) و Ahmadaali و همکاران (2020) با نتایج این پژوهش همسو است.

به طور کلی اتلاف آب از گیاه از قبیل تبخیر و تعرق در گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ توسط عوامل گیاهی و محیطی تعیین می‌گردد. اثر عوامل محیطی روی تبخیر و تعرق به‌نام نیاز اتمسفری نامیده می‌شود. هر قدر نیاز اتمسفری بیشتر باشد، آب با سرعت بیشتری از یک سطح آزاد می‌تواند تبخیر شود. عوامل تشعشع خورشیدی، دما، رطوبت نسبی و باد مهمترین عواملی هستند که روی نیاز اتمسفری تأثیر می‌گذارند. از میزان تشعشعی که توسط برگ جذب می‌شود و حدود ۷۵ تا ۸۵٪ آن به مصرف گرم کردن برگ و تعرق می‌رسد. افزایش تشعشع خورشید موجب افزایش نیاز اتمسفری می‌گردد. افزایش دما ظرفیت پذیرش آب توسط هوا را افزایش می‌دهد (شکل اثرات باد بر تعرق و ساختمان روزه‌ها). این بدین معنی است که نیاز اتمسفری با افزایش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. (شکل‌های تغییرات پتانسیل آب اتمسفری نسبت به تغییر رطوبت نسبی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد و تأثیرات دما بر روی ظرفیت نگهداری آب در هوا). تعرق موقعی صورت می‌گیرد که بخار آب از طریق روزه به بیرون منتشر می‌شود. در هوای آرام یک مانع اختلاف فشار، متشکل از یک لایه آب در اطراف روزه ایجاد می‌گردد که شیب انتشار بین برگ و هوا را کاهش می‌دهد (Sokhtsarai et al., 2019). این بدین معنی است که آبی که از سطح مرطوب درونی برگ به بیرون منتشر می‌شود در مقابل خود با یک لایه آب از بیرون برگ روبه‌رو می‌باشد. این لایه شیب انتشار بین برگ و هوا را در نتیجه تعرق کاهش می‌دهد. وقتی هوای متلاطم (باد) رطوبت موجود در نزدیکی برگ را دور می‌سازد اختلاف پتانسیل آب داخل برگ و هوای مجاور روزه‌ها و نیز انتشار آب از برگ افزایش می‌یابد (Javadi and Bah-ramnejad, 2011).

بنابراین با توجه به موارد مطرح شده می‌توان گفت مقدار تبخیر تعرق پتانسیل بستگی به مقدار انرژی

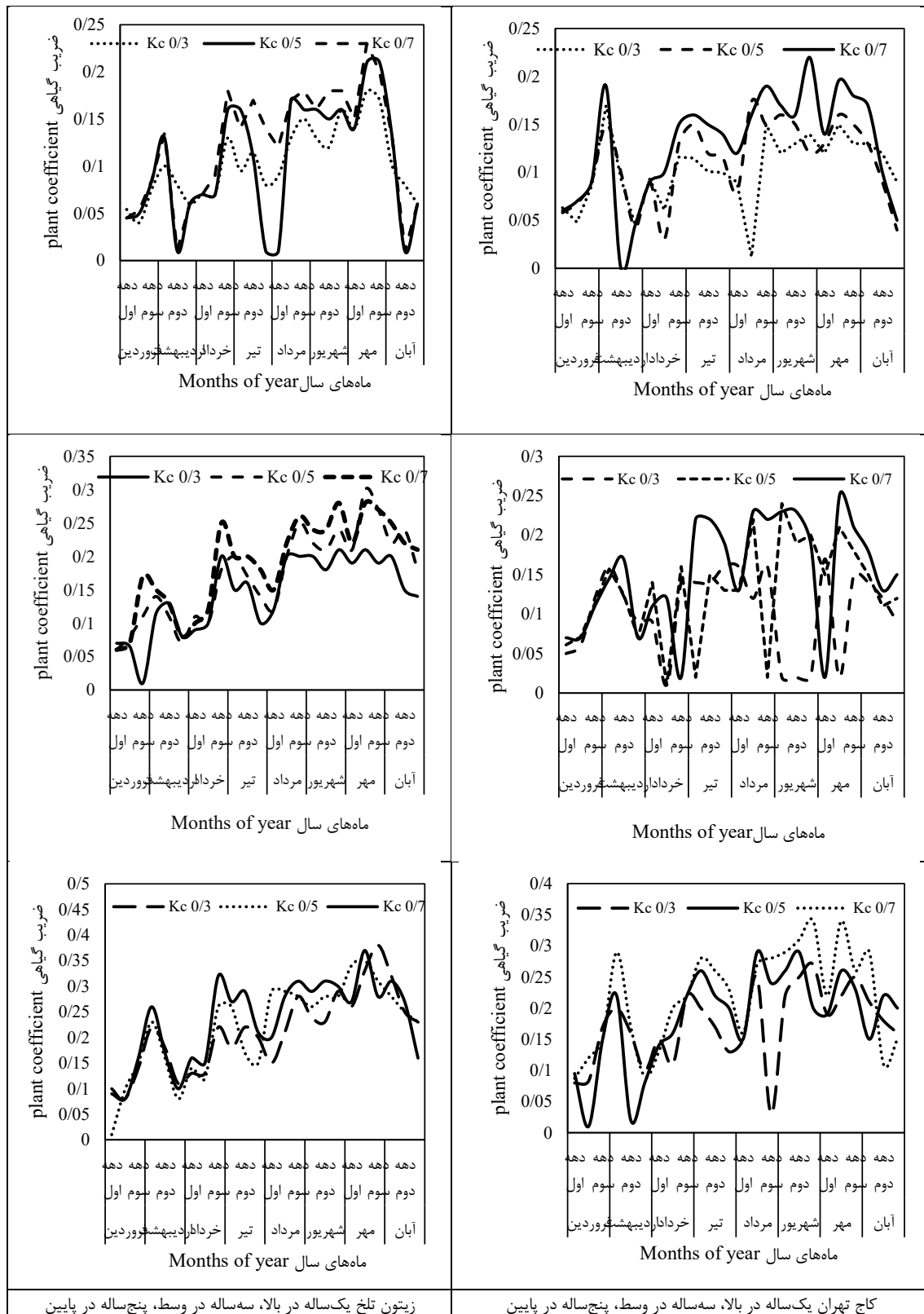
که برابر با ۰/۰۱ است (شکل ۵). بیشترین مقدار ضریب گیاهی کاج تهران سه ساله در تنش خشکی ۰/۷ در دهه دوم ماه آبان حاصل شد که مقدار آن برابر با ۰/۳۹ است در حالی که کمترین مقدار آن در دهه اول ماه اسفند و برابر با ۰/۰۳ می‌باشد. بیشترین مقدار ضریب گیاهی کاج تهران پنج‌ساله در تنش خشکی ۰/۷ مربوط به دهه سوم ماه شهریور و مقدار آن برابر با ۰/۳۴ است در حالی که کمترین مقدار آن در دهه اول ماه فروردین برابر با ۰/۰۸۷ می‌باشد (شکل ۵).

بیشترین مقدار ضریب گیاهی در زیتون تلخ یک‌ساله و در تنش خشکی ۰/۷ مربوط به دهه دوم ماه مهر و مقدار آن برابر با ۰/۲۲ است در حالی که کمترین مقدار آن در دهه اول ماه فروردین برابر با ۰/۰۴۵ می‌باشد. بیشترین فراوانی ضریب گیاهی زیتون تلخ سه‌ساله در تنش خشکی ۰/۷ مربوط به دهه دوم ماه خرداد و مقدار آن برابر با ۰/۴۱ است در حالی که کمترین مقدار آن در دهه دوم ماه دی برابر با ۰/۰۱۶ می‌باشد. بیشترین میزان ضریب گیاهی زیتون تلخ پنج‌ساله در تنش خشکی ۰/۷ مربوط به دهه دوم ماه مهر و مقدار آن برابر با ۰/۳۷ می‌باشد در حالی که کمترین مقدار آن در دهه دوم ماه فروردین اتفاق می‌افتد و برابر با ۰/۰۸۱ است (شکل ۵).

نتایج آنالیز واریانس میانگین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل و ضریب گیاهی (Kc) در گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف بین میانگین‌ها به احتمال ۹۹٪ در تیمارهای تنش خشکی مختلف است (شکل‌های ۶ و ۷).

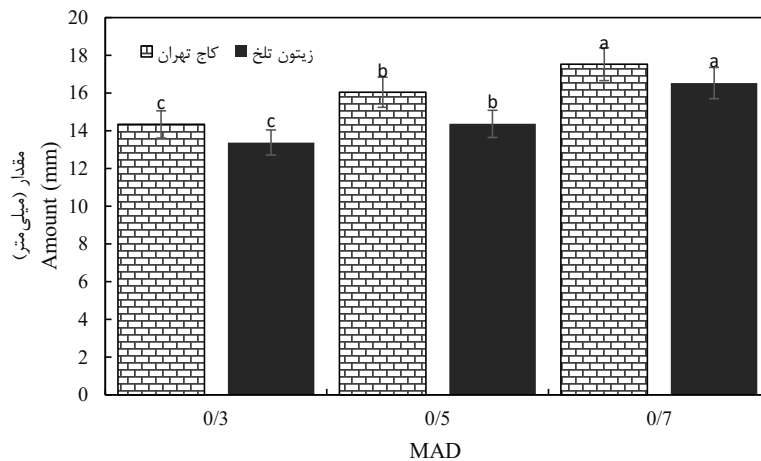
بحث

نمودار تبخیر- تعرق پتانسیل برای گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در تنش‌های خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در ماه‌های گرم‌تر سال یعنی از خرداد تا مهر دارای بیشترین مقدار می‌باشد در حالی که در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و آبان دارای کمترین مقدار است. با وجود تفاوت در بین گونه‌های انتخاب شده برای این مطالعه از نظر سوزنی یا پهن برگ بودن این حالت دارای روند کم و بیش مشابهی می‌باشد. یافته‌های Hashemi Garmdareh (2005)، Shokrollahza-

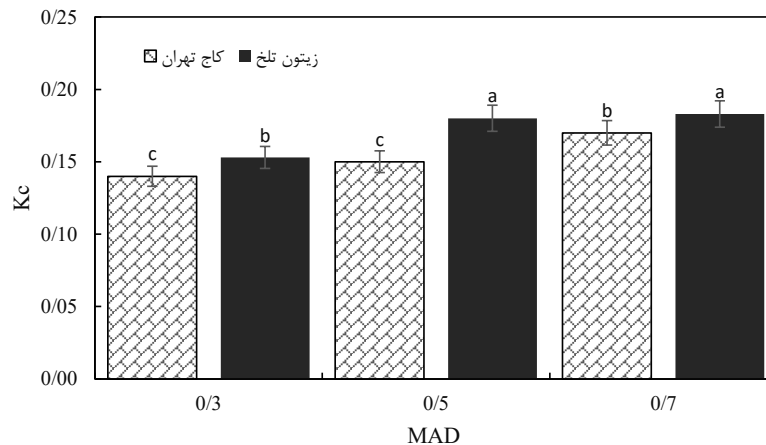


کاج تهران یکساله در بالا، سهساله در وسط، پنجساله در پایین
 زیتون تلخ یکساله در بالا، سهساله در وسط، پنجساله در پایین
 شکل ۵. ضریب گیاهی گونه‌های کاج تهران (سمت راست) و زیتون تلخ (سمت چپ) در سنین یک، سه و پنج سالگی در بازه زمانی مورد مطالعه

Fig 5. Vegetation coefficient of Tehran pine (right) and Chinaberry(left) at 1, 3 and 5 ages in the studied period



شکل ۶. مقدار تبخیر تعرق پتانسیل در حدهای مجاز تقلیل رطوبت مختلف در گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در بازه زمانی مورد مطالعه
Fig 6. The amount of potential transpiration evaporation in the permissible limits of different moisture reduction in Tehran pine and Chinaberry in the studied period



شکل ۷. مقدار ضریب گیاهی در حدهای مجاز تقلیل رطوبت مختلف در گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در بازه زمانی مورد مطالعه
Fig 7. The value of plant coefficient in the permissible limits of different moisture reduction in Tehran pine and Chinaberry in the studied period

خود مثل سبز شدن، رشد رویشی، گلدهی و بذردهی در معرض تنش کمبود آب و افزایش تبخیر تعرق باشد (Amiri and Eslamian, 2010).

بیشترین مقدار ضریب گیاهی کاج تهران و زیتون تلخ در سن پنج سالگی و در تنش خشکی ۰/۷ اتفاق افتاد که مربوط به ماه‌های شهریور و مهر و مقدار آن به ترتیب برابر با ۰/۳۴ و ۰/۳۷ است در حالی که کمترین مقدار آن در دهه اول و دوم ماه فروردین اتفاق می‌افتد و مقدار آن به ترتیب برابر با ۰/۰۸۷ و ۰/۰۸۱ می‌باشد. نتایج مطالعه Hashemi Garmdareh (2005) با یافته‌های تحقیق جاری در یک راستا قرار دارد. از طرفی میانگین ضریب گیاهی در کاج تهران برای

موجود برای عمل تبخیر داشته و از روزی به روز و فصلی به فصل دیگر متغیر است (Sanchez-Blanco et al., 2014). زمانی که در شرایط خشک تلفات آب از گیاه بر اثر تبخیر تعرق بیش از جذب می‌شود، در گیاه کمبود آب حادث شده و گیاه دچار تنش خشکی و افزایش تبخیر تعرق می‌گردد (Tabari and Hosseinzadeh Talae, 2011). تنش خشکی و افزایش تبخیر تعرق می‌تواند آناتومی و مورفولوژی، فیزیولوژی و بیوشیمی گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد و تقریباً بر کلیه جنبه‌های رشد و نمو آن‌ها تأثیر بگذارد (Ozturk and Sakcali, 2004). گیاه ممکن است در دوره رشد، در فصول خاص و یا در مراحل خاصی از نمو

است. زیتون تلخ درختی خزان کننده با برگ‌های مرکب مضاعف، انبوه، ناپایا، متناوب، با دم‌برگ کوتاه، برگچه‌هایی به رنگ سبز تیره، متقابل، نوک تیز، دنداندار یا لوبدار و بدون کرک است. در حالی که کاج تهران دارای سوزن‌هایی به رنگ سبز تیره و پوشیده شده با غباری کم‌رنگ، به طول ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر بوده و در دسته‌های ۲ برگی درون غلاف‌های کوتاهی به رنگ قهوه‌ای روشن تا خاکستری قرار دارند. گرچه در نگاه اول ممکن است این طور به نظر برسد که به دلیل پهن برگ بودن گونه زیتون تلخ نیاز آبی بیشتری در مقایسه با کاج تهران دارد اما در واقع گونه کاج تهران به دلیل داشتن تعداد بسیار زیاد سوزن‌های دوتایی و بلند به طول ۸-۱۵ سانتی‌متر در تاج خود دارای نیاز آبی بیشتری نسبت به زیتون تلخ می‌باشد.

گیاهان متفاوت مقادیر متفاوتی از آب را در طول دوره رشد استفاده می‌نمایند. به طور کلی با توجه به یکسان بودن بافت خاک در این مطالعه عوامل گیاهی مؤثر بر نیاز آبی این گونه‌ها شامل مواردی از قبیل نوع گیاه، مرحله‌ی رشد، سطح برگ (شاخص سطح برگ)، نوع برگ و تعداد روزنه‌های هوایی موجود در آن‌ها، طول و تراکم ریشه‌ها است.

در زمینه بررسی تعیین نیاز آبی گونه‌های مورد استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطالعات مشابهی جهت مقایسه‌ی نتایج آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر انجام نشده است. با این حال، به طور کلی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک گیاهان در مراحل مختلف نمو خود به طور دائم در معرض کمبود آب قرار دارند (Zanotelli et al., 2019) و در طرح‌های جنگل‌کاری در این مناطق نیز نیاز است این نکته مورد عنایت قرار گیرد. گیاهان به طور طبیعی در طی تحول مکانیسم‌هایی را برای سازگاری در طی زمان حاصل نموده‌اند؛ گرچه عموماً علیرغم این سازگاری‌ها کمبود آب اثرات سوئی بر گیاهان داشته و ممکن است برخی از این اثرات برگشت‌ناپذیر باشند. در جنگل‌کاری‌ها و طرح‌های گسترش فضای سبز در این مناطق نیز نیاز است فرآیندهای طبیعی را مد نظر قرار داده و از آن‌ها الگو گرفته شود، تا هم بر اساس نیاز آبی گیاه عمل

سنین، یک، سه و پنج در تنش‌های ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۷ به‌ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۱۱ و ۰/۱۳؛ ۰/۱۳، ۰/۱۵ و ۰/۱۷؛ ۰/۱۸۵، ۰/۱۹۷ و ۰/۲۲ می‌باشد در حالی که میانگین ضریب گیاهی در زیتون تلخ برای سنین، یک، سه و پنج در تنش‌های ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۷ به‌ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۳؛ ۰/۱۴، ۰/۱۷ و ۰/۱۹؛ ۰/۲۱، ۰/۲۳ و ۰/۲۳۵ می‌باشد. یافته مطالعه Moazenpour Kerma-ni و همکاران (2017) با نتایج مطالعه حاضر همسو می‌باشد.

ضریب گیاهی بستگی به عواملی مانند نوع گیاه، مرحله رشد و شرایط آب و هوایی محل دارد. ضریب گیاهی یک مقدار ثابت نبوده و مقدار آن در طول دوره رویش گیاه تغییر می‌کند. با دقت در روند داده‌ها، مراحل رشد گیاه به چهار مرحله مرحله ابتدایی، مرحله توسعه گیاه، مرحله میانی و پایانی تقسیم گردید. در هر دو گونه مورد مطالعه، در مرحله ابتدایی ضریب گیاهی نسبت به مرحله رشد و توسعه دارای مقدار کمتری بود و در مرحله رشد و توسعه ضریب گیاهی به سرعت افزایش یافت. در مرحله میانی، تغییرات آن به سمت مقدار ثابتی میل می‌کرد و ضریب گیاهی در این مرحله نسبت به بقیه مراحل بسیار اندک بود. حداکثر مقدار ضریب گیاهی در مرحله میانی رخ داد که دلیل آن نیاز زیاد گیاه به آب در نتیجه محصول دهی است. در نهایت، با افت ضریب گیاهی، مرحله پایانی رشد گیاه نیز به وقوع پیوست. به نظر می‌رسد بیشتر بودن ضریب گیاهی در گونه زیتون تلخ به دلیل تفاوت نیازهای اکولوژیک این گونه نسبت به کاج تهران باشد. این درخت (زیتون تلخ) طالب مکان‌های آفتاب‌گیر و خاک‌های بارخیز، عمیق، خنک و زهکشی شده است اما در انواع خاک‌ها توان رستن دارد، به خشکی مقاوم است، یارای تحمل یخبندان را دارد و تا حدی به شوری خاک مقاومت نشان می‌دهد. در حالی که گونه کاج تهران، گونه‌ای کم‌نیاز است و قادر به رویش در خاک‌های آهکی و حتی کمی شور و مقاوم به خشکی، سرما و گرما می‌باشد (Jaziraei, 2011). از دلایل بیشتر بودن نیاز آبی گونه کاج تهران نسبت به زیتون تلخ، تفاوت مورفولوژی برگ این گونه‌ها

- Effect of Soil Texture and Different Levels of Irrigation Amount on Water Requirement and Crop Coefficient of *Melia azedarach* L. in Karaj Area. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3195-3205. [In Persian].
- Allan, 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.
- Alihourri, M., Naseri, A., Broumandnesb, A. & Kayani, A. (2015). Effect of low irrigation and irrigation water salinity on soil salinity distribution and vegetative growth of date seedlings. *Journal of water and soil resources protection*, 46 (3), 475-486. [In Persian].
- Alizadeh, A. (2014). The relationship between water, soil and plants. Publications of Ferdowsi University of Mashhad, 728 p. [In Persian].
- Amiri, M. J. & Eslamian, S. (2010). Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*. 3 (4), 208-216.
- Ansaryan Mahabadi, S., Allah dadi, I., Ghorbani Javid, M., & Soltani, E. (2019). Effect of corm priming with salicylic acid and mother corm weight on flowering and qualitative characteristics of saffron stigma. *Saffron Agronomy and Technology*, 7(1), 41-53. [In Persian].
- Asgari, M., Javanmiri Pour, M., Etemad, V., Liaqat, A. & Eskandari Rad, A. (2022). Morphological characteristics of sparrow tongue (*Fraxinus rotundifolia* Mill), mulberry (*Morus alba*) and black maple (*Acer negundo*) seedlings in greenhouse and field under water stress in Rabat Karim. *Environmental Science*, 20(2), 117-134. [In Persian].
- Asgari, M., Javanmiri Pour, M., Etemad, V., & Ahmadaali, K. (2024). Effect of Drought Stress on Morphological Characteristics of Tehran Pine (*Pinus eldarica* Medw.) and Bitter Olive (*Melia azedarach* L.) at Various Ages. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(4), 87-104. [In Persian].
- Bakhshi khaniki G, Javadi S, Mehdikhani P, & Tahmasebi, D. (2011). Investigation of drought stress effects on some quantity and quality آبیاری صورت گیرد و هم نهال قابلیت بقا و ماندگاری در شرایط پر از تنش و نامساعد موجود را داشته باشد. در حالت خودرو و طبیعی تحمل به خشکی ناشی از تعدادی از مکانیسم‌های سازگاری بوده و عموماً گریز یا فرار از دوره خشکی، اجتناب از خشکی و بقا در خشکی سه مکانیسم عمده سازگاری و تحمل گیاه به خشکی هستند. در جنگل کاری‌ها نیز چون اصول فرار از دوره خشکی و اجتناب از خشکی در دسترس نیستند و باید در طی سازوکارهای فیزیولوژیک در طی زمان شکل گیرند، مکانیسم بقا در خشکی روشی است که با توجه به آن و فراهم نمودن ابزارهای نیل به آن از طریق انجام آبیاری با توجه به نیاز آبی گونه‌های مورد نظر برای جنگل کاری از قبیل زیتون تلخ و کاج تهران می‌توان به موفقیت طرح‌های جنگل کاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک امیدوار بود.
- ### نتیجه‌گیری
- رژیم‌های خشکی بر نیاز آبی گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در سنین مختلف رویشی تأثیرگذار است. بر اساس نتایج مقدار نیاز آبی گونه کاج تهران در رژیم‌های رطوبتی مورد مطالعه از گونه زیتون تلخ بیشتر است. با افزایش میزان تقلیل رطوبتی مجاز مقدار نیاز آبی گونه‌های کاج تهران و زیتون تلخ در همه سنین مورد بررسی افزایش می‌یابد. بنابراین نیاز است در طرح‌های جنگل کاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک نکات تنش خشکی مناسب (۰/۷) در نظر گرفته شود تا شرایط مناسب برای رشد و ماندگاری در شرایط سخت برای این درختان فراهم گردد.
- ### سپاسگزاری
- این پژوهش با اعتبارات شهرداری تهران، سازمان بوستان‌ها و فضای سبز شهر تهران به انجام رسیده است که از آن‌ها کمال قدردانی به عمل می‌آید.
- ### منابع
- Ahmadee, M., Khashei-Siuki, A., & Sayyari Zahan, M. H. (2016). Comparison of Efficiency of Different Equations to Estimate the Water Requirement in Saffron (*Crocus sativus* L.) (Case Study: Birjand Plain, Iran). *Journal Of Agroecology*, 8(4), 505-520. [In Persian].
- Ahmadaali, K., Rahimi, H., & Etemad, V. (2021).

- specialized in law enforcement*, 8 (21), 49-79. [In Persian].
- Karamian, R. & Atai Barazandeh, p. (2013). Studying the effect of salinity stress on some growth indices in three species of the genus *Onobrychis* in Iran. *Journal of plant biology of Iran*, 5 (15), 69-82. [In Persian].
- Karimi Alawijeh, M. & Zarei, A. (2010). Plant behavior in response to cold stress. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 15 (60), 124-138. [In Persian].
- Kassem, M. A. (2007). Water requirements and crop coefficient of Date Palm trees, *Irrigation And Drainage Journal, Misr J. Ag. Eng.* 24(2), 339-359.
- Moazenpour Kermani, M., Mohammadi Mohammad Abadi, A., Badie Nashin, A. & Noori, H. (2017). Measurement of transpiration evaporation and plant coefficient of pistachio in Rafsanjan region. *Agricultural meteorology*, 5(2), 47-55. [In Persian].
- Nowrozi Haroni, N. & Tabari Khokhsarai, M. (2015). Morphophysiological responses of acacia (*Robinia pseudoacacia* L.) seedlings to drought stress, *Journal of Forestry and Wood Products. Journal of Natural Resources of Iran*, 8 (3), 715-727. [In Persian].
- Ozturk, M. & Sakcali, M.S. (2004). Ecophysiological behaviour of some Mediterranean plants as suitable candidates for reclamation of degraded areas. *Journal of Arid Environments*, 57 (2), 141-153.
- Rahimi, H., Ahmadali, Kh. & Etemad, V. (2020). Determining the plant coefficient of purple (*Cercis siliquastrum* L) in soil and different levels of irrigation. *Iranian Irrigation and Drainage Journal*, 15 (6), 2100-2111. [In Persian].
- Rezayan, A. & Rezayan, A. (2016). Prospective research of water crisis in Iran by scenario method, *Ecohydrology journal*, 3(1), 1-17. [In Persian].
- Salimi Soban, M., Mansouri, K. & Yaghfour, H. (2018). Evaluation of plant species and its effectiveness in urban planning (case study: streets of Zahedan city). *Geographical Engineering Journal*, 2 (3), 73-84. [In Persian].
- characteristics of new eugenics sugar beet genotypes. *NCMBJ*, 1 (3), 65-74. [In Persian].
- Bamanian, M., Metousali, M. & Habibpour, A. (2008). Examination of the needs and objectives of creating water supply and irrigation systems of urban green spaces with raw water, the third national conference of green spaces and urban landscape, Kish Island. [In Persian].
- Bostani, A. & Ansari, H. (2011). Examining the consumption approach in urban water demand management. *Agricultural Engineering and Natural Resources*, 9 (33), 48-52. [In Persian].
- Ewaid, S.H, Abed, S.A. & Al-Ansari, N. (2019) Crop Water Requirements and Irrigation Schedules for Some Major Crops in Southern Iraq. *Water*. 11(4), 756.
- Hashemi Garmdareh, A. (2005). Estimating the water requirement of some dominant species in the greenery of Isfahan using a lysimeter. Master thesis of Isfahan University of Technology. 125 p. [In Persian].
- Heydari, N. (2006). Sustainable water management and productivity in irrigation networks of catchment areas under water stress (case study of Zayandeh River irrigation network of Isfahan), management technical workshop. Operation and maintenance of irrigation and drainage networks, Tehran, <https://civilica.com/doc/115820>. [In Persian].
- Jafari, H., Afrasiab, P., Delbari, M. & Taheri, M. (2016). Determining transpiration evaporation and plant coefficient of olive in different stages of growth using telemetry technique and moisture balance in Tarem Zanjan. *Irrigation and Water Engineering Research*, 7(24), 120-134. [In Persian].
- Javadi, T., & Bahramnejad, B. (2011). Relative Water Content and Gas Exchange of Three Wild Pear Genotypes under Water Stress Conditions. *Journal Of Horticultural Science*, 24(2), 223-233. [In Persian].
- Jaziraei, M. (2011). plantation in dry land, Tehran University Press, third edition, 532 p. [In Persian].
- Karmi, T. & Ghaffarian Behrman, M. (2017). Future research of water crisis and its security challenges (case study: Rafsanjan city). *Scientific journal -*

areas. *Journal of natural resources*, 52 (1), 63-75. [In Persian].

Sanchez-Blanco, M., J., Alvarez, S., Fernanda Ortun˜o, M. & M. Carmen Ruiz-Sa´nchez. (2014). Root System Response to Drought and Salinity: Root Distribution and Water Transport, Management of irrigation with marginal waters in the nursery production of ornamental plants and in the maintenance of the urban vegetation landscape, Chapter 15.

Shokrallahzadeh, M.R., Miri, H.R. & Abbasizadeh, M. (2016). Determining the water requirement of the elm species *Ulmus carpinifolia* and *Nerium oleander* using the WUCOLS III method in the green space of Shiraz city, Iran Scientific Research Conference on Agriculture, Genetic Engineering and Medicinal Plants, in electronic form, Elm Mohoran Asman Company. [In Persian].

Sokhtsarai, R., Ebadi, A., Salami, A. & Haji Ahmad, P. (2019). Physiological and biochemical response of seedlings of three cultivars of white, ruby and chafete grapes to drought stress. *Journal of plant production research*, 26 (2), 1-13. [In Persian].

Tabari, H. & Hosseinzadeh Talaei, P. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change*, 79 (2011), 1–10.

Vaezirad, S., Shekari, F., Shiranirad, A. & Zangani, A. (2008). The effect of water deficit stress in different stages of growth on yield and components of grain yield in red bean cultivars. *Ecology of agricultural plants (new knowledge of agriculture)*, 4(10), 85-94. [In Persian].

Xu, C.-Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., & Singh, V.P. (2006). Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration in Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 327 (1-2), 81-93.

Zahedi Amiri, Gh. & Zargham, N. (2015). Carbon sequestration in terrestrial ecosystems. Tehran University Press, 500 p. [In Persian].

Zanotelli, D., Montagnani, L., Andreotti, C. & Tagliavini, M. (2019). Evapotranspiration and crop coefficient patterns of an apple orchard in a sub-humid environment. *Journal of Agricultural Water Management*, 226, 1-11.

Zehtabian, G. & Farshi, A.G. (2008). Estimating the water requirement of green space plants in dry



Prioritization of Factors Affecting Drought Using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method (Case Study: Torbat Heydarieh City)

Amir Reza Rezaeei¹, Ali Reza Roshani^{2*}

1. MSc. Student in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Agriculture Engineering-Water, Azad Islamic University, Torbat Heydarieh Branch, Torbat Heydarieh, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Agriculture Engineering-Water, Azad Islamic University, Torbat Heydarieh Branch, Torbat Heydarieh, Iran.

*Corresponding Author: Al.Roshani1347@iau.ac.ir

Keywords:

Increase in water consumption, Population growth, Precipitation reduction, Temperature increase, Weak management.

Extended abstract

Abstract

Introduction: Iran, one of the driest countries in the world, frequently experiences severe droughts. Drought is a result of the mutual effects of natural and social environments. Iran, due to its unique location and topographic features, is a vast country with a distinct climate. Iran's climate, both wet and dry, is characterized by the occurrence of drought. In recent years, many regions of the country have experienced severe and exceptional droughts, which have been very significant in terms of intensity and extent. Therefore, investigating the factors affecting drought is one of the basic needs of societies, managers, and national and regional planners. Torbat Heydarieh city is located in Razavi Khorasan province and is characterized by dry and semi-arid climate conditions. In this city, agriculture is one of the main indicators of people's employment and drought can have significant effects on the economic prosperity of this region. On the other hand, there are relatively few studies on the factors affecting drought in Torbat Heydarieh city, which indicates a research gap. Considering that factors affecting drought have not been comprehensively investigated so far, conducting this research by comprehensively investigating the factors affecting drought and using the fuzzy analytical hierarchical process technique can provide useful and effective suggestions to reduce the effects of drought.

Materials and Methods: In this research, the prioritization of the factors affecting drought using the fuzzy analytical hierarchy Process technique has been investigated in Torbat Heydarieh city. The statistical community consisted of 15 individuals with more than 10 years of work experience in this field, as well as agricultural experts. We used interviews and expert opinions to confirm the validity of the questionnaire, and used Cronbach's alpha test to confirm its reliability. The experts identified 19 sub-indices in the form of 5 main ones that influence drought in Torbat Heydarieh city after

Received:

04 February 2024

Revised:

16 March 2024

Accepted:

24 March 2024

How to cite this article:

Rezaeei, A.M., & Roshani, A.R. (2024). Prioritization of Factors Affecting Drought Using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method (Case Study: Torbat Heydarieh City). *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 77-92. [10.22077/JDCR.2024.7255.1057](https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.7255.1057)



reviewing the theoretical literature of the research.

Results: Based on the results obtained using the fuzzy analytical hierarchical process technique, prioritization of the main indicators from most to least was in the order of “human factors”, “cultural factors”, “social factors”, “climatic factors” and “geographical factors”. The prioritization of all sub-indices based on their weight in each main index and also, by considering the weight of the main indices, was in the following figure.

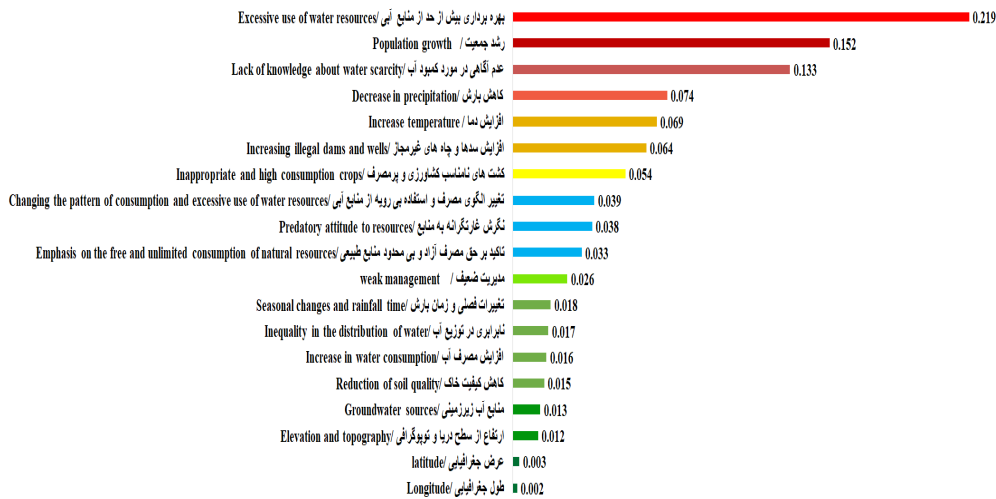


Fig 1. Prioritization and final weight of variables affecting drought in Torbat Heydarieh city

Conclusion: Based on the obtained results, it was found that among the 19 investigated sub-indices, the sub-indices of “excessive use of water resources” had the highest degree of importance, the sub-indices of “population growth”, “lack of awareness about water shortage”, “reduction of rainfall”, “increase in temperature”, “increase in unauthorized dams and wells” and “unsuitable and intensive crops” were placed in the next grade. “Longitude and latitude”, “elevation and topography” and “underground water resources” as sub-indices of the main index of “geographical factors” had the least impact on drought in this city.



اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر خشکسالی با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی (مورد مطالعه: شهرستان تربت حیدریه)

امیررضا رضائی^۱، علیرضا روشنی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی کشاورزی- آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی کشاورزی- آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

*نویسنده مسئول: Al.Roshani1347@iau.ac.ir

چکیده

ایران از جمله کشورهای خشک دنیاست که در معرض خشکسالی‌های شدید قرار دارد. خشکسالی حاصل تأثیرات متقابل محیط طبیعی و اجتماعی است و اثرات پدیدۀ خشکسالی نه تنها بر تولید محصولات کشاورزی، بلکه به‌طور همزمان بر تمامی موجودات زنده تأثیرگذار است. در این پژوهش اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر خشکسالی با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری سلسله مراتبی فازی در شهرستان تربت حیدریه مورد بررسی قرار گرفته است. جامعه آماری شامل خبرگان در این زمینه و کارشناسان جهاد کشاورزی با بیش از ۱۰ سال سابقه کاری به تعداد ۱۵ نفر بودند. روایی پرسشنامه از طریق مصاحبه و استعلام نظرات خبرگان و پایایی آن از طریق آزمون آلفای کرونباخ تأیید گردید. پس از بررسی ادبیات نظری پژوهش، تعداد ۱۹ عامل فرعی در قالب ۵ عامل اصلی مؤثر بر خشکسالی در شهرستان تربت حیدریه از نظر خبرگان شناسایی شد. اولویت عوامل اصلی مؤثر بر خشکسالی در این شهرستان به ترتیب اهمیت آن‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به صورت «عوامل انسانی»، «عوامل فرهنگی»، «عوامل اجتماعی»، «عوامل اقلیمی» و «عوامل جغرافیایی» می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده مشخص شد که در میان ۱۹ زیرشاخص مورد بررسی، زیرشاخص «بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی» دارای بالاترین درجه اهمیت بوده و زیرشاخص‌های «رشد جمعیت»، «عدم آگاهی در مورد کمبود آب»، «کاهش بارش»، «افزایش دما»، «افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز» و «کشت‌های نامناسب و پرمصرف کشاورزی» در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. «طول و عرض جغرافیایی»، «ارتفاع از سطح دریا و توپوگرافی» و «منابع آب زیرزمینی» به‌عنوان زیرشاخص‌های شاخص اصلی «عوامل جغرافیایی» کمترین میزان تأثیر بر خشکسالی را در این شهرستان داشتند.

واژه‌های کلیدی:

افزایش دما، افزایش مصرف آب، رشد جمعیت، کاهش بارش، مدیریت ضعیف.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۱/۱۵

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۱/۰۵

مقدمه

خشکسالی یک بلای طبیعی نامشهود است که می‌تواند در هر آب و هوایی رخ دهد (Shiravand and Bayat, 2023). خشکسالی طی سالیان گذشته آسیب‌های زیادی به بخش کشاورزی و جامعه روستایی و شهری وارد کرده است. در دهه‌ی اخیر، رویکرد مقابله با شرایط و رخدادهای طبیعی، جای خود را به کنار آمدن و زندگی کردن با آن‌ها داده است (Arboni et al., 2022). منشأ اصلی خشکسالی کمبود بارش طی یک دوره‌ی طولانی از زمان است که معمولاً یک فصل یا بیشتر می‌باشد. در واقع خشکسالی وضعیتی است که در آن، منطقه برای مدتی، کمتر از باران انباشته، باران ورودی دریافت می‌کند و این موضوع کاهش قابل توجهی در ذخایر آب زیرزمینی و سطحی موجود را به همراه دارد و می‌تواند تأثیرات زیادی بر اقلیم مناطق شهری و روستایی داشته باشد (Ebadi et al., 2023). خشکسالی حاصل تأثیرات متقابل محیط طبیعی و اجتماعی است و اثرات پدیده‌ی خشکسالی نه تنها بر تولید محصولات کشاورزی، بلکه به‌طور همزمان بر تمامی موجودات زنده اعم از گونه‌های گیاهی و جانوری (اهلی و وحشی) مؤثر بوده و همچنین بر انسان‌ها تأثیرگذار است. در هر صورت، از آنجایی که مفهوم خشکسالی مفهومی پیچیده است، برای جلوگیری از سوء تفاهم و ارائه‌ی تعابیر مختلف، تعریف واضح و روشن آن بسیار مهم است (Razmkhah et al., 2022).

کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به یک میزان از خشکسالی آسیب نمی‌بینند و این‌ها به خاطر تفاوت در اقلیم بلکه به علت تفاوت در مدیریت آن‌ها می‌باشد. معمولاً مدیریتی که هم‌اکنون برای جلوگیری و مقابله با خشکسالی در جریان می‌باشد ساخت سدهای بیشتر، افزایش پروژه‌های شیرین کردن آب و انجام حفاری‌ها است (Mansuri Mogha-dam et al., 2000). در نتیجه با اعمال این نوع مدیریت نه تنها مشکل حل نخواهد شد؛ بلکه بهره‌برداری بیش از حد و ناپایدار از منابع آبی و نهایتاً تشدید مشکل را نیز به دنبال خواهد داشت (Mansuri Mogha-adam et al., 2000; Zalaghi et al., 2013). دولت برای

متوقف کردن خشکسالی می‌بایست عوامل مؤثر بر خشکسالی را در اولویت برنامه‌های استراتژیک خود قرار دهد زیرا واضح است که افزایش استحصال آب راهکار مناسبی نخواهد بود. عوامل بسیاری از جمله عوامل اقلیمی، عوامل انسانی، عوامل اجتماعی، عوامل اقتصادی و عوامل فرهنگی بر خشکسالی مؤثر هستند. تأثیرات ناشی از عوامل آب و هوایی به‌کندی رخ می‌دهد، اما تأثیراتی که توسط فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود، سریع‌تر شتاب می‌گیرد و شدیدتر است. بنابراین فعالیت‌های انسانی یکی از مهم‌ترین عوامل خشکسالی است زیرا تخریب زمین، خشکسالی و بیابان‌زایی همگی پیامدهای فعالیت‌های انسانی هستند. کشت شیمیایی کشاورزی، کشاورزی تک کشت و تغییر در حاصلخیزی و زهکشی خاک همگی از عوامل تخریب زمین هستند. فعالیت‌های انسانی بسیار پیچیده بوده و نه تنها خطر خشکسالی را افزایش می‌دهند بلکه پیش‌بینی وقوع و شدت آن را نیز دشوارتر می‌کنند (Wijitkosum and Sriburi, 2019). ایران کشوری پهناور است که به‌دلیل موقعیت خاص و ویژگی‌های توپوگرافی، آب و هوای متفاوتی دارد. علاوه بر کمبود بارندگی، نوسانات شدید بارندگی در مقیاس روزانه، فصلی و سالانه از جمله ویژگی‌هایی است که باعث عدم اطمینان کافی در دریافت حداقل بارندگی مورد نیاز برای مصارف کشاورزی، تغذیه‌ی جریان‌های سطحی و زیرزمینی و مصارف انسانی می‌شود. با توجه به وجود نوسانات منفی شدید بارندگی در مناطق مختلف کشور، وقوع این خشکسالی‌ها اثرات بسیار زیانباری را بر بخش کشاورزی و اقتصادی کشور تحمیل می‌کند. به‌طور کلی باید گفت که وقوع خشکسالی یکی از ویژگی‌های اصلی اقلیم ایران است که هم در اقلیم مرطوب و هم در اقلیم خشک قابل مشاهده است. این حالت در نتیجه نوسانات شدید آب و هوا در مقیاس‌های زمانی مختلف به‌دست می‌آید. ویژگی‌های خشکسالی در ایران نشان می‌دهد که به‌طور کلی هیچ منطقه‌ای از کشور از این پدیده در امان نیست و متناسب با وضعیت طبیعی خود آثار این پدیده مخرب را تجربه می‌کند. اما نواحی جنوبی، شرقی و مرکزی کشور بیشتر در معرض این پدیده

به‌طور مستقیم مدیریت خشکسالی را تبیین می‌کنند (Shafeie et al., 2019). افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی، صنعتی و خانگی، عدم آگاهی در مورد کمبود آب، نگرش غارتگرانه به منابع، تأکید بر حق مصرف آزاد و بی‌محدود منابع طبیعی، اختلافات قومی و سیاسی، رشد جمعیت، تغییر الگوی مصرف، نابرابری در توزیع آب، استفاده بی‌رویه از منابع آبی از مهمترین عوامل انسانی و محرک‌های خشکسالی محسوب می‌شوند (Harris et al., 2017).

تغییر اقلیم یک نیروی محرکه اصلی است که بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیرگذار است و منجر به افزایش مخاطرات طبیعی می‌شود. در میان این مخاطرات طبیعی، خشکسالی یکی از مخرب‌ترین‌هاست و با توجه به تغییرات اقلیمی پیچیده‌تر می‌شود. جهان زیب و همکاران (Jehanzaib et al., 2020) به مطالعه احتمال انتشار خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از یک مدل گرافیکی احتمالی در سراسر کره جنوبی پرداختند. در این مطالعه احتمال وقوع انتشار حالت‌های مختلف خشکسالی هواشناسی که منجر به حالت‌های مختلف خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود، تحت سناریوهای تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش قابل توجه احتمال انتشار خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی تحت تغییرات آب و هوایی بود. دما نقش مهمی در تعریف خشکسالی در فصول خشک و گرم ایفا می‌کند و تجزیه و تحلیل الگوهای گردش جوی نشان می‌دهد که معمولاً تغییرات بزرگ مقیاس در سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی و ناهنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیل می‌توانند محرک‌های احتمالی خشکسالی در منطقه باشند (Ul-Shiravand and Bayat, 2022). شیراوند و بیات (2023) نیز به ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی در ایران براساس منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند میانگین وزنی پرداختند. بررسی اقشار آسیب‌پذیر از نظر ظرفیت سازگاری نشان داد که مناطق شمالی کشور از بالاترین ظرفیت سازگاری برخوردار هستند. کمترین میزان سازگاری مربوط به شهرهای واقع در جنوب استان کرمان، غرب استان خراسان رضوی و استان

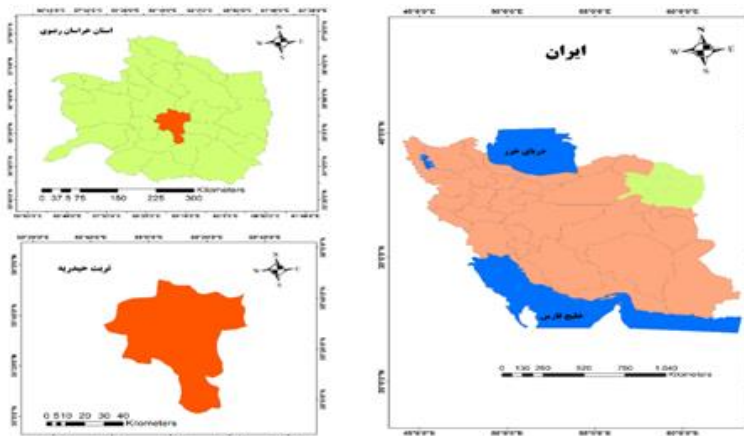
قرار گرفته و به دلیل وجود نوسانات زیاد در مقادیر بارندگی آسیب‌پذیرتر می‌باشند (Arboni et al., 2022). پیش‌بینی‌های پژوهشگران از داده‌های آب و هوایی مناطق مختلف ایران نشانگر افزایش شدت و گسترش خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است (KhakiFirouz et al., 2022). سابقه‌ی مطالعات موجود نشان می‌دهد که در اغلب سال‌ها، پدیده‌ی خشکسالی برخی نقاط و یا حتی کل کشور را در بر گرفته است. در سال‌های گذشته بسیاری از مناطق کشور خشکسالی‌های شدید و استثنایی را تجربه کرده که از نظر شدت و وسعت دارای اهمیت بسیاری بوده‌اند. از این‌رو بررسی عوامل مؤثر بر خشکسالی یکی از نیازهای اساسی جوامع، مدیران و برنامه‌ریزان ملی و منطقه‌ای می‌باشد. به‌طور مثال استان خوزستان در سال ۱۳۸۹ شدیدترین خشکسالی اقلیمی را در یکصد سال گذشته تجربه کرده که مهمترین دلایل آن نیز ساخت سدهای بیشتر، افزایش پروژه‌های شیرین کردن آب و انجام حفاری‌ها است (Zalaghi et al., 2013). براساس نتایج حاصل از پایش خشکسالی در استان خراسان رضوی مشخص گردید که در سال ۱۳۸۶ خشکسالی نسبتاً شدید در استان حاکم بوده است. همچنین با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های ترکیبی پارامترهای بارش، درصد رطوبت نسبی، متوسط حداقل دما و متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، مهمترین عوامل اقلیمی مؤثر بر خشکسالی این استان می‌باشند (Zalaghi et al., 2013). از طرفی با بررسی‌های انجام گرفته مشخص گردید که عوامل انسانی (افزایش جمعیت و توسعه‌ی صنایع تبدیلی، عدم رعایت حقالله‌ی دریاچه، برداشت بیش از حد مجاز از آب‌های زیرزمینی و...) با سهمی حدود ۳۰ درصد به‌همراه عوامل طبیعی (کاهش نزولات آسمانی و ورودی آب به رودخانه، افزایش دما و تبخیر و...) با سهمی حدود ۷۰ درصد دست به دست هم داده و دریاچه ارومیه را در بحرانی‌ترین شرایط زیست‌محیطی خود قرار داده‌اند (Ataee, 2013). نتایج حاصل از تحلیل عوامل مؤثر بر مدیریت خشکسالی در مناطق روستایی نیز نشان می‌دهد که ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، و نهادی زیربنایی

در منطقه‌ای با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. در این شهرستان، کشاورزی یکی از حوزه‌های اصلی اشتغال مردم است و خشکسالی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رونق اقتصادی این منطقه داشته باشد. شهرستان تربت‌حیدریه به دلیل وابستگی به کشاورزی، صنایع تبدیلی و تجارت آب و خوراک دام، قابلیت کمتری نسبت به تحمل خشکسالی در مقایسه با سایر شهرهای ایران دارد. بنابراین، بررسی عوامل مؤثر بر خشکسالی در این منطقه می‌تواند به تشخیص راهکارهایی برای تنوع اقتصادی و پایداری منطقه کمک کند. براساس دیدگاه کارشناسان، با وجود توانمندی تربت‌حیدریه در حوزه‌ی کشاورزی، کم‌توجهی به عرصه‌ی منابع طبیعی شهرستان باعث فرسایش خاک این خطه شده است که می‌تواند به تغییر اقلیم نیز منجر شود و البته برخی نشانه‌های آن مشهود و ملموس است. عمده منابع طبیعی تربت‌حیدریه به جنگل، مرتع و بیابان اختصاص دارد که متأسفانه بر اثر دست‌درازی انسان و شرایط اقلیمی و کم‌توجهی صورت گرفته طی ادوار گذشته روز به روز عرصه‌های جنگلی و مرتعی آن فقیرتر می‌شود. طی ۱۵ تا ۲۰ سال اخیر برخی مراتع تربت‌حیدریه بر اثر دست‌اندازی انسان توأم با خشکسالی به بیابان تبدیل شده و از دیگرسو کانون‌های فرسایش بادی به تخریب خاک به‌خصوص در دشت‌های جنوب تربت‌حیدریه و مه‌ولات منجر شده است. با بررسی ادبیات خشکسالی مشخص می‌شود که بسیاری از تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده به‌صورت پراکنده به بررسی عوامل مؤثر بر خشکسالی پرداخته‌اند (Mansuri Moghadam et al., 2000; Maryanaji, 2021; Mozafari et al., 2017; Kiani Salmi and Amini Faskhoodi, 2018; Kavakebi et al., 2015; Tajri et al., 2015). از طرفی مطالعات نسبتاً کمی در مورد عوامل مؤثر بر خشکسالی به‌ویژه در شهرستان تربت‌حیدریه وجود دارد که بیانگر یک شکاف تحقیقاتی است. بنابراین تحقیق حاضر با دیدگاه جامع‌تر در پی پر کردن این شکاف می‌باشد. در میان مطالعاتی که به عوامل مؤثر بر خشکسالی می‌پردازند، بسیاری بر روی موضوعات سیاستی مبتنی بر رویکردهای توصیفی یا کیفی

ایلام است. همچنین شهرهای استان‌های سیستان و بلوچستان و جنوب کرمان از نظر مؤلفه حساسیت در رده‌ی بسیار آسیب‌پذیر قرار دارند. خطر خشکسالی در مناطق غربی و شرقی کشور متوسط و زیاد است و تنها مناطق مرکزی و کویری کشور و بخش‌هایی از مناطق شمال غرب کشور از آسیب‌پذیری و ریسک کمتری نسبت به سایر نقاط کشور برخوردار هستند. همچنین عوامل مؤثر بر حساسیت تخریب زمین و بیابان‌زایی در یک حوضه‌ی آبخیز مستعد خشکسالی در تایلند توسط و جیکوسم و همکاران (Wijitkosum et al., 2019) انجام شد. در این تحقیق از ۵ عامل خطر شامل عوامل اقلیمی، خاک، جغرافیایی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی و عوامل منابع آب همراه با ۱۵ عامل فرعی برای تجزیه و تحلیل حساسیت به تخریب زمین استفاده گردید. این تحقیق نشان داد که عوامل کلیدی تخریب اراضی و بیابان‌زایی در حوضه‌ی آبخیز به‌ترتیب مربوط به عوامل خاک و پس از آن عوامل اقلیمی، جغرافیایی، منابع آب و بهره‌برداری از اراضی و پوشش گیاهی است. کوی و همکاران (Cui et al., 2021) در تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر رویداد خشکسالی براساس داده‌های GRACE تحت شرایط مختلف آب‌وهوایی در چین دریافتند که بارش و تبخیر و تعرق از عوامل اصلی بروز خشکسالی هستند و در شرایط آب‌وهوایی مختلف نقش‌های متفاوتی را ایفا می‌کنند. حسینی و همکاران (Hosseini-Moghari et al., 2017) رویکرد فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی در مدیریت خشکسالی در حوضه‌ی آبریز گرگانرود را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش با معیارهای کیفی، ذهنیت، عدم قطعیت و ترکیب قضاوت‌های گروهی همراه بود. با این حال، FAHP به عنوان یک ابزار عملی برای تصمیم‌گیری عمل کرد.

ایران از جمله کشورهای خشک دنیاست که در معرض خشکسالی‌های شدید قرار دارد. خشکسالی می‌تواند تأثیرات منفی بر محیط زیست مناطق مختلف داشته باشد. کاهش منابع آبی و تغییر الگوهای بارش می‌تواند منجر به کاهش تأمین آب سطحی و زیرزمینی شود و در نتیجه، منابع طبیعی و گیاهان محلی را تهدید نماید. شهرستان تربت‌حیدریه در استان خراسان رضوی و

درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی، در ارتفاع ۱۳۳۳ متری از سطح دریا واقع شده است. این شهر، یکی از شهرهای استان خراسان رضوی است که در فاصله ۱۴۱ کیلومتری جنوب مشهد قرار دارد (شکل ۱). از میان ۲۸ شهر استان خراسان رضوی، تربت‌حیدریه یکی از بحرانی‌ترین شهرهای استان در زمینه کم‌آبی محسوب می‌شود. بیش از ۹۰ درصد از منابع آبی تربت‌حیدریه در بخش کشاورزی و مابقی در بخش صنعت و مصارف خانگی استفاده می‌شود. کاهش بارندگی، خشکسالی و کشت محصولات آبی که به آب فراوان نیاز دارند همچون چغندر، هندوانه، خربزه، پنبه و همچنین حفر بیش از حد چاه آب از دلایل بحرانی شدن دشت‌های تربت‌حیدریه هستند. استمرار خشکسالی با تسریع در مهاجرت کشاورزان و دامداران، تأثیر منفی خشکسالی را بر اقتصاد روستاهای تربت‌حیدریه مضاعف کرده است. همچنین در این مناطق سطح زمین به دلیل کم‌آبی دچار فرسایش و برهنگی شده و نه تنها باران را جذب نمی‌کند بلکه باعث تبدیل بارندگی به سیلاب و تخریب بیشتر منابع طبیعی می‌گردد. بنا بر دلایل ذکر شده، در این پژوهش عوامل مؤثر بر خشکسالی در این شهرستان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی شهرستان تربت‌حیدریه

Fig 1. Geographical location map of Torbat Heydarieh city

فرضیه‌ها، توصیفی-پیمایشی است. تحقیق توصیفی شامل مجموعه روش‌هایی است که هدف آن‌ها توصیف شرایط یا پدیده‌های مورد بررسی است؛ اما تحقیق توصیفی نیز می‌تواند برای شناخت بیشتر شرایط موجود یا یاری‌دادن به فرآیند تصمیم‌گیری استفاده

متمرکز شده‌اند. درحالی‌که این تحقیق همراه با چالش فوق، به‌طور انتقادی به نیاز به توسعه‌ی یک رویکرد تحلیل کمی و کارآمد به‌منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر خشکسالی شهرستان تربت‌حیدریه اشاره می‌کند. همچنین با توجه به اینکه تاکنون به‌طور جامع عوامل مؤثر بر خشکسالی مورد بررسی قرار نگرفته است؛ انجام این تحقیق با بررسی جامع عوامل تأثیرگذار بر خشکسالی و با استفاده از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی می‌تواند پیشنهادات مفید و مؤثری جهت کاهش اثرات خشکسالی ارائه دهد. در واقع ارزیابی و شناسایی عوامل مؤثر بر خشکسالی در این شهرستان برای آماده‌سازی، تدوین و انجام اقدامات کاهش‌ی و جلوگیری از مشکلات آینده ضروری به‌نظر می‌رسد. لذا با توجه به مطالب اظهار شده هدف اصلی این تحقیق شناسایی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر خشکسالی در شهرستان تربت‌حیدریه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

این تحقیق در شهرستان تربت‌حیدریه انجام شده است. شهر تربت‌حیدریه مرکز شهرستان تربت‌حیدریه در ۵۳ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی و ۳۵

این تحقیق از نظر هدف کاربردی است چرا که هدف تحقیقات کاربردی توسعه‌ی دانش کاربردی در زمینه‌ای خاص است. یا به‌عبارت دیگر تحقیقات کاربردی به سمت کاربرد عملی دانش هدایت می‌شوند. پژوهش حاضر از نظر روش جمع‌آوری داده‌ها برای آزمون

جهت سنجش روایی پرسشنامه، از معتبرترین روش موجود برای این کار یعنی انجام مصاحبه و استعلام نظرات اساتید و خبرگان و اعمال اصلاحات احتمالی آن‌ها و برای تعیین پایایی پرسشنامه نیز از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. پارامتر آلفای کرونباخ برای مقیاس پرسشنامه در این تحقیق ۰/۸۹ به دست آمد که بیانگر پایایی مناسب ابزار تحقیق می‌باشد. در واقع این تحقیق در دو بخش انجام شد؛ در بخش اول تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به پرسشنامه و شناسایی عوامل اصلی و فرعی مؤثر بر خشکسالی شهرستان تربت‌حیدریه با استفاده از نرم افزار SPSS و Excel انجام و مؤلفه‌ها و شاخص‌های معنادار استخراج شد. در بخش دوم نیز با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و نرم افزار EXPERT Choice مؤلفه‌ها و شاخص‌های انتخاب‌شده رتبه‌بندی گردید.

شود. پیمایشی بودن آن نیز از این جهت است که پژوهشگر به طریق میدانی به مطالعه نمونه می‌پردازد. برای جمع‌آوری اطلاعات میدانی از ابزار پرسشنامه استفاده شد. پرسشنامه‌ی اول با هدف شناسایی عوامل اصلی و فرعی در قالب طیف ۵ تایی لیکرت و پرسشنامه‌ی دوم با هدف تعیین وزن و الویت‌بندی این عوامل براساس مقایسات زوجی طراحی گردید. اما جامعه‌ی آماری این تحقیق خبرگان در این زمینه و کارشناسان جهاد کشاورزی در شهر تربت‌حیدریه با بیش از ۱۰ سال سابقه کاری به تعداد ۲۵ نفر بودند که با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند ۱۵ نفر از خبرگان شناسایی شدند و پرسشنامه‌ی نهایی را تکمیل نمودند. در این تحقیق مطابق با مطالعات گذشته مهمترین عوامل مؤثر بر خشکسالی شناسایی و در قالب ۵ عامل اصلی دسته‌بندی و عوامل فرعی نیز متعاقباً در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مؤلفه‌ها و شاخص‌های شناسایی شده‌ی مؤثر بر خشکسالی
Table 1. Identified components and indicators affecting drought

منابع (Reference)	زیرشاخص‌ها (sub-indices)	شاخص اصلی (Main indicator)
Mozafari et al., (2017); Mansuri Moghadam, et al., (2000); Babaei et al., (2022); Zalaghi et al., (2013); Tajri et al., (2015); Staal et al., (2020); Mukherjee et al., (2018); Ataee (2013)	بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی، افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز، کشت‌های نامناسب کشاورزی و پرمصرف، مدیریت ضعیف (Excessive use of water resources, Increase of illegal dams and wells, Inappropriate and high consumption crops, weak management)	عوامل انسانی (Human Factors)
Mozafari et al., (2017); Kavakebi, et al., (2015); Babaei et al., (2022); KhakiFirouz et al., (2022); Tajri et al., (2015); Staal et al., (2020); Ullah et al., (2022); Wijitkosum and Sriburi (2019); Wijitkosum., et al., (2021); Heydari Alamdarloo et al., (2021); Apurv et al., (2017)	کاهش بارش، افزایش دما، کاهش کیفیت خاک، تغییرات فصلی و زمان بارش (Decrease in precipitation, Increase temperature, Reduction of soil quality, Seasonal changes and rainfall time)	عوامل اقلیمی (طبیعی) (Climatic factors)
Maryanaji et al., (2021); Wijitkosum., et al., (2021); Heydari Alamdarloo et al., (2021)	طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، توپوگرافی، منابع آب زیرزمینی (Longitude, latitude, Elevation and topography, Groundwater sources)	عوامل جغرافیایی (Geographic factors)
Harris et al., (2017); KhakiFirouz., et al., (2022)	افزایش مصرف آب، عدم آگاهی در مورد کمبود آب، نگرش غارتگرانه به منابع، تأکید بر حق مصرف آزاد و بی‌محدود منابع طبیعی (Increase in water consumption, Lack of knowledge about water scarcity, Predatory attitude to resources, Emphasis on the free and unlimited consumption of natural resources)	عوامل فرهنگی (Cultural factors)
Harris et al., (2017); Shafeie., et al., (2019)	رشد جمعیت، تغییر الگوی مصرف و استفاده بی‌رویه از منابع آبی، نابرابری در توزیع آب (Population growth, Changing the pattern of consumption and excessive use of water resources, Inequality in the distribution of water)	عوامل اجتماعی (Social factors)

$\{k_n, \dots\}$ مجموعه هدف به صورت $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ چانگ هر موضوع برای هر هدف به ترتیبی که انجام می‌شود مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین تحلیل M ، برای هر هدف ارزش‌گذاری شده که از طریق رابطه (۱) بدست آمده است:

$$M_{ki}^1, M_{ki}^2, M_{ki}^3, \dots, M_{ki}^m, i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

که در آن $k = (m, \dots, 1, 2, 3)$ همان اعداد فازی مثلثی^۲ بوده که پارامترهای آن l ، m و u به ترتیب عبارت بودند از کم احتمال‌ترین ارزش، محتمل‌ترین ارزش و بیشترین ارزش ممکن. یک عدد فازی مثلثی به صورت (l, m, u) نشان داده شده است.

در تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی پس از ترسیم درخت سلسله مراتب تصمیم، باید به مقایسه‌ی زوجی عناصر هر سطح مدل پرداخت. در مرحله‌ی انجام محاسبات، با استفاده از تعاریف و مفاهیم تحلیل سلسله مراتبی فازی، ضرایب هر یک از ماتریس‌های مقایسات زوجی محاسبه می‌شود (Azar and Fara-ji, 2016). ترسیم درخت سلسله مراتبی را می‌توان ساختار سلسله مراتب تصمیم دانست که با استفاده از سطوح هدف، معیار و گزینه ترسیم می‌گردد. بنابراین از ارزش S_k که یک عدد فازی مثلثی است؛ به منظور تعیین هر یک از سطرهای ماتریس مقایسات زوجی استفاده می‌شود. بخش‌های رابطه (۲) از روابط (۳)، (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند (Momeni and Sharifisalim, 2015).

$$S_k = \sum_{j=1}^n M_{gk}^j \otimes [\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij}]^{-1} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m M_{ij} = \left(\sum_{i=1}^m l_i \cdot \sum_{i=1}^m m_i \cdot \sum_{i=1}^m u_i \right) \quad i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ij} = \left(\sum_{i=1}^m l_i \cdot \sum_{i=1}^m m_i \cdot \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (4)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ki}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^m m_i} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i} \right) \quad (5)$$

پس از محاسبه همه S_k ها با استفاده از رابطه (۶)، درجه‌ی بزرگی هر یک از عناصر سطوح، نسبت به سایر عناصر آن سطح، به صورت جداگانه محاسبه می‌گردد.

2.1- Triangular fuzzy number (TFN)

تحلیل سلسله مراتب فازی (FAHP)

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چند منظوره است (Liu et al., 2020). این روش در هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب و معیار تصمیم‌گیری روبرو است می‌تواند استفاده گردد. معیارهای مطرح شده می‌توانند کمی و کیفی باشند. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسات زوجی نهفته است. تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتب تصمیم، آغاز می‌کند. درخت سلسله مراتب تصمیم، عوامل مورد مقایسه و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. سپس یک سری مقایسات زوجی انجام می‌گیرد. این مقایسات وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه‌های رقیب مشخص می‌سازد. در نهایت منطق AHP به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی را با همدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم بهینه حاصل آید (Momeni and Sharifisalim, 2015). هم اکنون کاربرد AHP بیشتر در تصمیم‌گیری سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی از تخصیص منابع، ارزیابی عملکرد، تعیین توالی کار و سایر موارد می‌باشد.

روش AHP بطور گسترده در انتخاب یک گزینه از بین سایر گزینه‌ها استفاده شده است، اما در AHP کلاسیک، مقایسات زوجی برای هر سطح با توجه به هدف انتخاب بهترین گزینه با استفاده از مقیاس نه‌تایی انجام می‌شود؛ بنابراین AHP متعارف و کلاسیک، در دستیابی دقیق نیازمندی‌های تصمیم‌گیران، ناکافی و ناکارآمد به نظر می‌رسد. به منظور مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها در ترجیحات افراد بشر، ثنوری مجموعه‌های فازی باید با مقایسات زوجی به‌عنوان توسعه‌ای از تکنیک AHP ترکیب شود. این تکنیک تصمیم‌گیری ترکیبی درک دقیق‌تری از فرآیند تصمیم‌گیری ارائه داده است (Momeni and Sharifisalim, 2015).

در این قسمت تحلیل سلسله مراتبی فازی که در ابتدا توسط چانگ (Chang 1996)، معرفی شد، مورد بررسی قرار گرفته است. اگر مجموعه موضوعات به صورت

1.1- Fuzzy Analytic Hierarchy Process

همان‌طور که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود شاخص «عوامل انسانی» در بین شاخص‌های اصلی دارای وزن ۳۶/۴ درصد است. وزن زیرشاخص‌های این شاخص اصلی به ترتیب اولویت به صورت «بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی» با وزن ۶۰/۳ درصد، «افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز» با وزن ۱۷/۶ درصد، «کشت‌های نامناسب کشاورزی و پرمصرف» با وزن ۱۴/۹ درصد و «مدیریت ضعیف» با وزن ۷/۲ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج موجود، زیرشاخص‌های «بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی»، «افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز» و «کشت‌های پرمصرف و نامناسب کشاورزی» تأثیر بسزایی در بروز پدیده‌ی خشکسالی در شهرستان تربت‌حیدریه دارند. همچنین بابایی و همکاران (Babae et al., 2022) در شناسایی عوامل مؤثر بر خشک شدن آب دریاچه ارومیه دریافتند که افزایش سدها بدون برنامه، حفرچاه‌های غیرمجاز، وجود کشت‌های نامناسب کشاورزی و پرمصرف، شیوه‌های سنتی آبیاری، افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی، صنعتی و خانگی، برداشت‌های غیرمجاز از آب‌های سطحی از مهمترین عوامل انسانی مؤثر بر خشک شدن این دریاچه می‌باشند.

بعد «عوامل اجتماعی» در بین شاخص‌های اصلی دارای وزن ۲۰/۸ درصد است. وزن زیرشاخص‌های این شاخص به ترتیب اولویت به صورت «رشد جمعیت» با وزن ۷۳/۱ درصد، «تغییر الگوی مصرف و استفاده بی‌رویه از منابع آبی» با وزن ۱۸/۸ درصد و «تابرایی در توزیع آب» با وزن ۸/۱ درصد می‌باشد. به‌طور کلی شاخص «عوامل اجتماعی» از نظر درجه‌ی اهمیت در ایجاد پدیده خشکسالی در شهرستان تربت‌حیدریه، بعد از شاخص‌های «عوامل انسانی» و «عوامل فرهنگی» جای می‌گیرد و در بین زیرشاخص‌های این شاخص، «رشد جمعیت» بیشترین تأثیر را در ایجاد خشکسالی دارد. کیانی سلمی و امینی فسخودی (Kiani Salmi and Amini Faskhoodi, 2018) در مطالعه‌ی متفاوت به تبیین عوامل اجتماعی خشکسالی و شناسایی آثار آن بر جوامع روستایی پرداختند. نتایج آن‌ها مبین آن است که تفاوت معناداری از حیث میزان آثار اجتماعی خشکسالی میان دهستان‌های مختلف وجود دارد.

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_2) = 1 & \text{if } m_1 \geq m_2 \\ V(M_1 \geq M_2) = 0 & \text{if } l_2 \geq u_1 \\ V(M_1 \geq M_2) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۶)$$

میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از k عدد فازی مثلثی دیگر از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$V(M_1 \geq M_2, \dots, M_k) = V(M_1 \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } V(M_1 \geq M_k) \quad (۷)$$

برای محاسبه وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسات زوجی از رابطه (۸) استفاده می‌شود.

$$w'(x_i) = \min\{V(S_i \geq S_k)\} \quad k=1,2,\dots,n \quad k \neq i \quad (۸)$$

بردار وزن شاخص‌ها به صورت رابطه (۹) خواهد بود که همان بردار ضرایب غیربهنجار تحلیل سلسله مراتبی فازی است.

$$W' = [W'(x_1) \cdot W'(x_2) \cdot \dots \cdot W'(x_n)] \quad (۹)$$

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر پرسشنامه‌ی مقایسات زوجی ابعاد اصلی «عوامل مؤثر بر خشکسالی» و مقایسات زوجی زیرشاخص‌های هر بعد بین ۲۵ نفر از خبرگان که در این زمینه سابقه داشتند، توزیع گردید و در نهایت ۱۵ پرسشنامه تکمیل شده برگشت داده شد. سپس از تلفیق ۱۵ پرسشنامه به دست آمده و تجمیع آرا خبرگان، پرسشنامه تلفیقی به دست آمد. در نهایت ماتریس‌های مقایسات زوجی نهایی با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در نرم‌افزار اکسل فرمول نویسی شد. وزن‌دهی نهایی هر شاخص با ضرب وزن به دست آمده برای آن شاخص در زیرگروه خود، در وزن بعد اصلی مربوطه محاسبه شد. برای تعیین سازگاری و ناسازگاری نظرات خبرگان، نرخ ناسازگاری هر یک از جداول مقایسات زوجی محاسبه گردید.

براساس نتایج به دست آمده با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، اولویت‌بندی ابعاد اصلی از بیشترین به کمترین به ترتیب به صورت «عوامل انسانی»، «عوامل فرهنگی»، «عوامل اجتماعی»، «عوامل اقلیمی» و «عوامل جغرافیایی» می‌باشد. همچنین براساس نتایج حاصل از این روش، رتبه‌بندی زیرشاخص‌های هر شاخص اصلی نیز به دست آمده که در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. وزن و رتبه شاخص‌ها و زیرشاخص‌های مدل «عوامل مؤثر بر خشکسالی» در شهرستان تربت حیدریه

Table 2. Weight and grade of indicators and sub-indices of the model "Factors Affecting Drought" in Torbat Heydarieh

شاخص اصلی (Main indicator)	وزن شاخص اصلی (%) (Weight main indicator)	رتبه شاخص اصلی (Grade main indicator)	زیرشاخص (sub-indices)	وزن زیرشاخص (%) (Weight sub-indices)	رتبه زیرشاخص (Grade sub-indices)	وزن کلی (%) (total weight)	رتبه نهایی (Final grade)
عوامل انسانی (Human Factors)	36.4	1	مدیریت ضعیف (weak management)	7.2	4	2.62	11
			افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز (Increase of illegal dams and wells)	17.6	2	6.41	6
			کشت‌های نامناسب و پرمصرف (Inappropriate and high consumption crops)	14.9	3	5.42	7
			بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی (Excessive use of water resources)	60.3	1	21.95	1
			نابرابری در توزیع آب (Inequality in the distribution of water)	8.1	3	1.68	13
عوامل اجتماعی (Social factors)	20.8	3	رشد جمعیت (Population growth)	73.1	1	15.20	2
			تغییر الگوی مصرف و استفاده بی‌رویه از منابع آبی (Changing the pattern of consumption and excessive use of water resources)	18.8	2	3.91	8
			طول جغرافیایی (Longitude)	9.2	4	0.28	19
			عرض جغرافیایی (latitude)	9.9	3	0.31	18
عوامل جغرافیایی (Geographic factors)	3.1	5	ارتفاع از سطح دریا و توپوگرافی (Elevation and topography)	38.3	2	1.19	17
			منابع آب زیرزمینی (Groundwater sources)	42.5	1	1.32	16
			افزایش مصرف آب (Increase in water consumption)	7.2	4	1.59	14
			نگرش غارتگرانه به منابع (Predatory attitude to resources)	17.6	2	3.89	9
عوامل فرهنگی (Cultural factors)	22.1	2	تأکید بر حق مصرف آزاد و بی‌محدود منابع طبیعی (Emphasis on the free and unlimited consumption of natural resources)	14.9	3	3.29	10
			عدم آگاهی در مورد کمبود آب (Lack of knowledge about water scarcity)	60.3	1	13.33	3

ادامه جدول ۲. وزن و رتبه شاخص‌ها و زیرشاخص‌های مدل «عوامل مؤثر بر خشکسالی» در شهرستان تربت‌حیدریه
 Table 2 continues. Weight and grade of indicators and sub-indices of the model "Factors Affecting Drought" in Torbat Heydarieh

شاخص اصلی (Main indicator)	وزن شاخص اصلی (%) (Weight main indicator)	رتبه شاخص اصلی (Grade main indicator)	زیرشاخص (sub-indices)	وزن زیرشاخص (%) (Weight sub-indices)	رتبه زیرشاخص (Grade sub-indices)	وزن کلی (%) (total weight)	رتبه نهایی (Final grade)
عوامل طبیعی (اقلیمی) (Climatic factors)	17.6	4	کاهش باران (Decrease in precipitation)	42.3	1	7.44	4
			افزایش دما (Increase temperature)	39.1	2	6.88	5
			کاهش کیفیت خاک (Reduction of soil quality)	8.3	4	1.46	15
			تغییرات فصلی و زمان بارش (Seasonal changes and rainfall time)	10.2	3	1.79	12

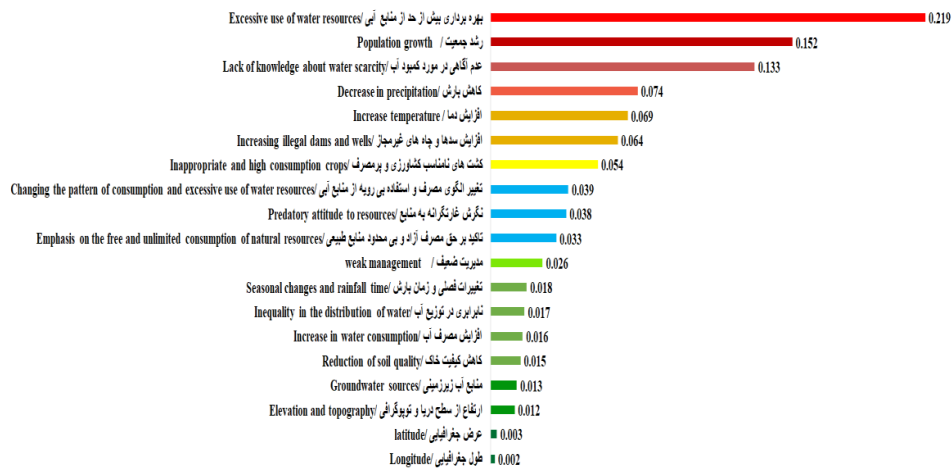
جامعه دارد؛ از این‌رو لازم است در سیاست‌گذاری‌های اصلاح الگوی مصرف در جامعه، به مقوله‌های اجتماعی و فرهنگی، توجه ویژه‌ای شود.

بعد «عوامل اقلیمی» وزن ۱۷/۶ درصد به خود اختصاص داد و وزن زیرشاخص‌های آن به‌ترتیب اولویت به‌صورت «کاهش بارش» با وزن ۴۲/۳ درصد، «افزایش دما» با وزن ۳۹/۱ درصد، «تغییرات فصلی و زمان بارش» با وزن ۱۰/۲ درصد و «کاهش کیفیت خاک» با وزن ۸/۳ درصد می‌باشد. هر چند کاهش بارش و افزایش دما سبب بروز خشکسالی در این منطقه شده، اما نقش عوامل دیگر در این رویداد پررنگ‌تر می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که نقش عوامل انسانی در بروز خشکسالی به‌مراتب بیشتر از عوامل اقلیمی است. مظفری و همکاران (Mozafari et al., 2017) نیز در مطالعات خود به نتایجی مشابه دست یافتند.

در نهایت اولویت‌بندی همه‌ی زیرشاخص‌ها براساس وزن آن‌ها در هر شاخص اصلی و همچنین با در نظر گرفتن وزن شاخص اصلی، به‌صورت «بهربرداری بیش از حد از منابع آبی»، «رشد جمعیت»، «عدم آگاهی در مورد کمبود آب»، «کاهش بارش»، «افزایش دما»، «افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز»، «کشت‌های نامناسب و پرمصرف»، «تغییر الگوی مصرف و استفاده‌ی بی‌رویه از منابع آبی»، «نگرش غارتگرانه به منابع»، «تأکید بر

همچنین در شاخص «عوامل جغرافیایی» که دارای وزن ۳/۱ درصد است؛ وزن زیرشاخص‌های این شاخص اصلی به‌ترتیب اولویت به‌صورت «منابع آب زیرزمینی» با وزن ۴۲/۵ درصد، «ارتفاع از سطح دریا و توپوگرافی» با وزن ۳۸/۳ درصد، «عرض جغرافیایی» با وزن ۹/۹ درصد و «طول جغرافیایی» با وزن ۹/۲ درصد می‌باشد. در پژوهش حاضر، «عوامل جغرافیایی» کمترین میزان تأثیر بر رویداد خشکسالی در منطقه مورد مطالعه را داشتند. در بررسی اثرات عوامل جغرافیایی بر خشکسالی در شهرستان اسدآباد توسط مریانجی (Maryanaji, 2021) نیز مشخص شد که حدود ۱۶ درصد از تغییرات مکانی خشکسالی‌ها به‌وسیله سه متغیر مکانی طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا توجیه می‌شوند.

در ادامه، در شاخص اصلی «عوامل فرهنگی» که وزن ۲۲/۱ درصد را به خود اختصاص داده است؛ وزن زیرشاخص‌های این شاخص اصلی به‌ترتیب اولویت به‌صورت «عدم آگاهی در مورد کمبود آب» با وزن ۶۰/۳ درصد، «نگرش غارتگرانه به منابع» با وزن ۱۷/۶ درصد، «تأکید بر حق مصرف آزاد و بی‌محدود منابع طبیعی» با وزن ۱۴/۹ درصد و «افزایش مصرف آب» با وزن ۷/۲ درصد می‌باشد. با توجه به یافته‌های این مطالعه می‌توان گفت که مسائل اجتماعی و فرهنگی جامعه، نقش مهمی در ترسیم فرهنگ و الگوی مصرفی



شکل ۲. اولویت‌بندی و وزن نهایی متغیرهای مؤثر بر خشکسالی در شهرستان تربت‌حیدریه

Fig 2. Prioritization and final weight of variables affecting drought in Torbat Heydarieh city

«عوامل انسانی» با وزن ۰/۳۶۴ مهم‌ترین شاخص و «عوامل فرهنگی» با وزن ۰/۲۲۱ دومین شاخص مهم و مؤثر بر خشکسالی شهرستان تربت‌حیدریه می‌باشد. شاخص‌های «عوامل اجتماعی» با وزن ۰/۲۰۸، «عوامل اقلیمی» با وزن ۰/۱۷۶ و «عوامل جغرافیایی» با وزن ۰/۰۳۱ نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

با توجه به رشد جمعیت، «بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی» و «همچنین عدم آگاهی لازم در مورد کمبود آب»، دو زیرشاخص مؤثر بر خشکسالی در این شهرستان هستند. «افزایش سدها و چاه‌های غیر مجاز» به‌عنوان یکی از زیرشاخص‌های شاخص «عوامل انسانی» و «کاهش بارش» و «افزایش دما» از زیرشاخص‌های شاخص «عوامل اقلیمی»، در اولویت‌های بعدی تأثیرگذاری بر خشکسالی در این منطقه می‌باشند. بنابراین اجرای طرح‌هایی برای جمع‌آوری و استفاده پایدار از منابع آب، افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی و صنعت، اعمال محدودیت‌های مصرف آب در بخش‌های مختلف و توزیع عادلانه‌ی این منابع می‌تواند به کاهش خشکسالی در شهرستان کمک کند.

بر اساس نتایج حاصل از تکنیک سلسله مراتبی فازی در این شهرستان، «عوامل اقلیمی» و «عوامل جغرافیایی» در مقایسه با «عوامل انسانی»، «عوامل فرهنگی» و «عوامل اجتماعی» از سهم کمتری در ایجاد خشکسالی برخوردار می‌باشند. تردیدی نیست که عوامل طبیعی چون کمبود یا عدم بارندگی و افزایش دما باعث

حق مصرف آزاد و بی‌محدود منابع طبیعی»، «مدیریت ضعیف»، «تغییرات فصلی و زمان بارش»، «نابرابری در توزیع آب»، «افزایش مصرف آب»، «کاهش کیفیت خاک»، «منابع آب زیرزمینی»، «ارتفاع از سطح دریا و توپوگرافی»، «عرض جغرافیایی» و «طول جغرافیایی» مشاهده شد (شکل ۲).

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این تحقیق شناسایی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر خشکسالی با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی در شهرستان تربت‌حیدریه بود. شهرستان تربت‌حیدریه در استان خراسان رضوی و در منطقه‌ای با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. در شهرستان تربت‌حیدریه، کشاورزی یکی از حوزه‌های اصلی اشتغال مردم است و خشکسالی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رونق اقتصادی این منطقه داشته باشد. شهرستان تربت‌حیدریه به دلیل وابستگی به کشاورزی، صنایع تبدیلی و تجارت آب و خوراک دام قابلیت تحمل خشکسالی کمتری نسبت به سایر شهرهای ایران دارد. بنابراین، بررسی عوامل مؤثر بر خشکسالی در این منطقه می‌تواند به تشخیص راهکارهایی برای تنوع اقتصادی و پایداری منطقه کمک نماید. با توجه به هدف اصلی، در این تحقیق تعداد ۱۹ عامل فرعی در قالب ۵ عامل اصلی مؤثر بر خشکسالی در شهرستان تربت‌حیدریه از نظر خبرگان شناسایی شد. نتایج تحلیل سلسله مراتبی فازی داده‌ها از نظر خبرگان نشان داد که شاخص

- Iran, [In Persian].
- Babae, M., Hosseini, Z. & Fijani, E. (2022). Assessing the role of meteorological and hydrological droughts on the drying up of the Bakhtegan and Tashk lakes, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11 (34), 79-100, [In Persian].
- Chang, D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95, 649-655.
- Cui, L., Zhang, Ch., Yao, Ch., Luo, Zh., Wang, X. & Li, Q. (2021). Analysis of the influencing factors of drought events based on GRACE data under different climatic conditions: A case study in Mainland China, *Water*, 13(18), 2575.
- Ebadi Nehari, Z., Erfanian, M. & Kazempour Choursi, S. (2023). A new method for evaluation and comprehensive drought Monitoring in the Urmia Lake Basin using a Synthesized Drought Index (SDI), *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 23 (68), 243-257, [In Persian].
- Harris, L. M., Nelson, D. R., Finnegan, G. & Gerrard, A. (2017). Irrigation and culture: The impact of institutions on water management in the Canadian Prairie, *Water Alternatives*, 10(3), 397-417.
- Heydari Alamdarloo, E., Khosravi, H., Nasabpour, S. & Gholami, A. (2021). Assessment of drought hazard, vulnerability and risk in Iran using GIS techniques, *Journal of Arid Land*, 12, 984-1000.
- Hosseini-Moghari, S.M., Araghinejad, S. & Azarnivand, A. (2017). Fuzzy analytic hierarchy process approach in drought management: case study of Gorganrood basin, Iran. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 66(3), 207-218.
- Jehanzaib, M., Sattar, M.N., Lee, J.H. & Kim, T.W. (2020). Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 7-21.
- Kavakebi, Gh., Mousavi Baygi, M., Mosaedi, A. & Jabari Noghabi, M. (2015). Determining of most Effective Factors on drought Useing of Panel Data Analyse (Khorasan Razavi Province), *Journal of Water and Soil*, 28 (6), 1298-1310, [In Persian].
- بروز خشکسالی می‌شوند. اما در بسیاری اوقات عوامل انسانی مانند فعالیت‌های نادرست کشاورزی، استفاده‌ی بی‌رویه از منابع، احداث سدها و چاه‌های غیرمجاز و ... در درازمدت موجب بروز خشکسالی گردیده که در تحقیق حاضر اثر عوامل انسانی در بروز پدیده‌ی خشکسالی به مراتب بیشتر از عوامل اقلیمی است. پس بایستی توجه داشت که حفظ و بهبود حوضه‌های آبخیز و منابع طبیعی مانند رودخانه‌ها، چشمه‌ها و آبگیرها، جلوگیری از نشت و هدررفت آب، احداث سدهای مهندسی‌ساخت و سازه‌های آبی به‌منظور حفظ آب و کاهش تبخیر و توسعه‌ی کشت بومی و سازگار با شرایط اقلیمی منطقه می‌تواند به حفظ تعادل آبی و کاهش اثر فعالیت‌های انسانی و جلوگیری از بروز و تشدید پدیده‌ی خشکسالی کمک نماید. در این پژوهش، «عدم آگاهی در مورد کمبود آب» نیز به‌عنوان یکی از زیرشاخص‌های مؤثر در بروز خشکسالی در شهرستان تریبت حیدریه شناخته شد. بنابراین برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌هایی در خصوص مدیریت بهینه و بهره‌برداری مناسب آب، بهبود فرهنگ مصرف آب در مصارف خانگی، کشاورزی و صنعتی و غیره می‌تواند به افزایش آگاهی و شناخت جامعه درباره خشکسالی و راهکارهای مقابله با آن، کمک شایان توجهی داشته باشد.

منابع

- Apurv, T., Sivapalan, M. & Cai, X. (2017). Understanding the role of climate characteristics in drought propagation, *Water Resources Research*, 53(11), 9304-9329.
- Arboni, Z., Mohammadi Yeghaneh, B., Einali, J., Farahani, H. & Cheraghi, M. (2022). Scenarios affecting the capacity building of villagers to reduce the effects of drought Case study: Zanjan townership, *Rural Development Strategies*, 9 (2), 259-276. [In Persian].
- Ataee, M. (2013). *Investigating the effective factors in the occurrence of drought in Lake Urmia in recent years*. The first national conference on environmental protection and planning, Hamedan, Iran, [In Persian].
- Azar, A. & Faraji, H. (2016). *Fuzzy management science*, Mehraban nashr publishing, Tehran,

- Management in Rural Areas, from the Viewpoint of Households (Case Study: Eslamaban Gharb), *Physical Geography Research Quarterly*, 51 (3), 403-416, [In Persian].
- Shiravand, H. & Bayat, A. (2023). Vulnerability and drought risk assessment in Iran based on fuzzy logic and hierarchical analysis, *Theoretical and Applied Climatology*, 1-13.
- Staal, A., Flores, B.M., Aguiar, A.P.D., Bosmans, J.H., Fetzer, I. & Tuinenburg, O.A. (2020). Feedback between drought and deforestation in the Amazon., *Environmental Research Letters*, 15(4), 044024.
- Tajri, A.R., Babanejad, M., Kardel, F. & Soleymani, K. (2015). Inspection of factors that influence the hydrological drought (Case study: Lorestan watershed province), *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 5 (16), 151-164, [In Persian].
- Ullah, I., Ma, X., Yin, J., Saleem, F., Syed, S., Omer, A., ... & Arshad, M. (2022). Observed changes in seasonal drought characteristics and their possible potential drivers over Pakistan, *International journal of climatology*, 42(3), 1576-1596.
- Wijitkosum, S. & Sriburi, T. (2019). Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from upper Phetchaburi River basin, Thailand, *Water*, 11(5), 939.
- Wijitkosum, S. (2021). Factor influencing land degradation sensitivity and desertification in a drought prone watershed in Thailand, *International Soil and Water Conservation Research*, 9(2), 217-228.
- Zalaghi, E., Zalaghi, E. & Kidkhorde, A. (2013). *Investigating the causes of drought crisis in Khuzestan and providing a solution in this field*. The 5th Water Resources Management Conference, Tehran, Iran, [In Persian].
- Persian].
- KhakiFirouz, Z., Niknami, M., Keshavarz, M. & Sabouri, M.S. (2022). Factors affecting of farmers resilience to drought: the case of Sistan plain, *Iran Agricultural Extension and Education Journal*, 18 (1), 161-179, [In Persian].
- Kiani Salmi, S. & Amini Faskhoodi, A. (2018). Identifying the Social factors of drought and uncovering its effect, *Spatial Planning*, 7(4), 1-18, [In Persian].
- Liu, Y., Eckert, C.M. & Earl, C. (2020). *A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements*, *Expert Systems with Applications*, 161, 113738.
- Mansuri Moghadam, S., Zalaghi, E. & Mehrjoo, F. (2000). *Investigating the causes of drought crisis in Khuzestan and providing a solution in this field*. The 5th international conference of new horizons in agricultural sciences, natural resources and environment, Tehran, Iran, [In Persian].
- Maryanaji, Z. (2021). *Investigating the effects of geographical factors on drought and agricultural development in Asadabad city*. The first national conference of community-oriented researches in agriculture, natural resources and environment, Hamedan, Iran, [In Persian].
- Momeni, M. & Sharifisalim, A. (2015). *Multi-indicator decision making models and software*, Mehraban nashr publishing, Tehran, Iran, [In Persian].
- Mozafari, M., GHaderi, R., Bedraghnejad, A. & Azad falah, Z. (2017). Identifying and prioritizing factors affecting the drying up of Lake Urmia based on the Delphi model, *Physical Geography Quarterly*, 10 (35), 101-114, [In Persian].
- Mukherjee, S., Mishra, A. & Trenberth, K.E. (2018). Climate change and drought: a perspective on drought indices, *Current climate change reports*, 4, 145-163.
- Razmkhah, H., Rostaee, R., Rostami Ravari, A. & Fararoe, A.R. (2022). *Investigating the effectiveness of meteorological drought profiles in assessing drought in Fars province*. The 4th National Hydrology Conference, Shahrkord, Iran, [In Persian].
- Shafeie, B., Barghi, H. & Ghanbari, Y. (2019). Analysis of the Effective Factors on Drought



Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's Self-Adjustment Index

Seyyed Mahmoud Hosseini Seddigh^{1*}, Masoud Jalali²

1. Ph.D Graduated, Department of climatology, Faculty of Social Sciences, Zanzan University, Zanzan, Iran.
2. Assistant Professor, Department of climatology, Faculty of Social Sciences, Zanzan University, Zanzan, Iran.

*Corresponding Author: Seyedmahmoudhoseiny@gmail.com

Keywords:

Drought, Trend of changes, Palmer's self-regulation index, Iran.

Extended abstract

Introduction:

Drought is one of the phenomena of climate change that endangers and transforms various social, economic and environmental sectors. Drought is both a danger and a disaster; It is dangerous because it happens unpredictably and is part of the natural variability of the climate system, and it is a disaster because it is related to the reduction of the rainfall regime and leads to the reduction of water storage for natural and agricultural ecosystems as well as other human activities. Severe and very severe droughts have occurred in parts of the country that have relatively more favorable rainfall conditions. Since Palmer's index is used in extensive studies and due to the need to investigate and evaluate drought and drought in different climatic regions of Iran, in this research, Palmer's drought severity self-assessment index is evaluated for the entire country.

Materials and Methods:

Drought is one of the extreme climatic phenomena that occurs in most parts of the world, but its manifestation is more common in arid and semi-Arid regions, and it also occurs over a long period of time and intermittently affects human societies through negative effects on water resources and agriculture. This, in turn, leads to economic challenges. One of the methods of investigating the drought situation in IRAN is the use of Palmer's Drought Intensity Self-Assessment index, which was used during the period from 1979 to 2018 and from the spatial resolution data of the Climate Research Unit of the University of East Anglia. The results of the research showed that the cities of Bam and Safiabad, Bojnord, Maneh and Samalqan, Gorgan, Shahroud, Tehran, Qazvin, Arak, Hamedan, Kashan, Bandar Lange, Fasa, Bandar Abbas, and West Khorramabad are experiencing severe to moderate droughts. These droughts covered IRAN by 22.06% in spring and 20.12% in summer. In general, the results indicate that

Received:

18 February 2023

Revised:

24 Decemer 2023

Accepted:

12 January 2024

How to cite this article:

Hosseini seddigh, S.H., & Jalali, M. (2024). Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's Self-Adjustment Index. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 93-106. [10.22077/JDCR.2024.6149.1016](https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.6149.1016)



the trend of severe to moderate droughts occurred from low latitudes to 33.75° latitude.

Results and Discussion:

ScPDSI data from the Climatic Research Unit of the University of East Anglia was calculated using input from interpolated fields of monthly precipitation and minimum and maximum air temperature observations available in the high-resolution CRU TS 2.1 and 3.23 datasets. Statistical data used for drought in IRAN with geographical coordinates of 25 to 40 degrees North latitude and 44 to 63 degrees East latitude in a period from January 1979 to January 2018 has a longitude resolution of 0.5*0.5. The method of calculating Palmer's Drought Severity Index is that for each month of the year, the values of four components related to soil moisture, along with their potential values, are needed. There are eight components, including evapotranspiration (ET), potential evapotranspiration (PE), moisture retention (R), potential moisture retention (PR), runoff (RO), potential runoff (PRO), moisture loss (L), and moisture loss potential (PL). The available water capacity closely influences the values of these components. Researchers at the University of Nebraska developed a program to calculate the scPDSI.

Conclusion:

The results showed that the cities of Bam and Safiabad, Bojnord, Maneh and Samalqan, Gorgan, Shahroud, Tehran, Qazvin, Arak, Hamedan, Kashan, Bandar Lange, Fasa, Bandar Abbas, and West Khorram Abad have experienced severe to moderate droughts. These droughts have covered IRAN with 22.06% in spring and 20.12% in summer. In general, the results showed that in the winter season of Iran, according to the self-measurement index of drought severity, 84.08% of the area was in drought conditions, and 15.88% was in drought conditions. According to the self-measurement index of drought severity, 86.47% of the area was in drought conditions, and 13.53% was in drought conditions. In the spring season, 93.53% of the area was in drought condition, and 6.46% was in drought condition. According to the self-measurement index of drought severity, 92.61% of the area was in drought conditions, and 31.7% was in drought conditions in the spring season of Iran. Comparing the trends of the Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in Iran, it is obvious that the spring and summer seasons have the most drought compared to the autumn and winter seasons. The trend of Palmer's drought intensity self-assessment index (scPDSI) based on latitude, from low latitudes to 33.75 degrees north, has the highest drought intensity.



ارزیابی تغییرات خشکسالی ایران با شاخص خودتنظیم پالمر

سید محمود حسینی صدیق^{۱*}، مسعود جلالی^۲

۱. دانش آموخته دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

*نویسنده مسئول: Seyedmahmoudhoseiny@gmail.com

واژه‌های کلیدی:

خشکسالی، روند تغییرات، شاخص خودتنظیم پالمر، ایران.

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های حدی آب و هوایی است که در بیشتر نقاط جهان اتفاق می‌افتد ولی تاثیر آن در مناطق خشک و نیمه خشک بیشتر است و همچنین در یک بازه زمانی طولانی و به صورت متناوب جوامع بشری را از طریق اثرات منفی بر روی منابع آب و کشاورزی و به دنبال آن اقتصاد دچار مشکل می‌سازد. یکی از روش‌های بررسی وضعیت خشکسالی کشور ایران استفاده از شاخص‌های خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر می‌باشد. در تحقیق حاضر جهت بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص خود تنظیم پالمر طی دوره زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸، از داده‌های تفکیک مکانی ۵/۵*۵/۵ درجه واحد تحقیقات آب و هوایی دانشگاه انگلیس شرقی استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که شهرهای بجنورد، مانه و سملقان، گرگان، شاهرود، تهران، قزوین، اراک، همدان، کاشان، بندرلنگه، فسا، بندرعباس، و غرب خرم‌آباد دچار خشکسالی‌های شدید تا متوسط هستند؛ که این خشکسالی‌ها در فصل بهار با ۲۲/۰۶ درصد و در تابستان با ۲۰/۱۲ درصد ایران را فرا گرفته است. به طور کلی نتایج حاکی از آن است که روند خشکسالی‌های شدید تا متوسط از عرض‌های جغرافیایی پایین تا ۳۳/۷۵° درجه عرض جغرافیایی رخ داده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۱/۲۹

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۰/۲۲

مقدمه

کشور ایران به واسطه موقعیت جغرافیایی ویژه خود محل تلاقی بسیاری از پدیده‌های طبیعی با جنبه‌های اثرگذاری مثبت و منفی بر زندگی ساکنان آن است. از یکسو قرارگیری در جنوب منطقه‌ی معتدله آب و هوایی و در ادامه خط سیر گردش سلول هادلی و پرفشار جنب حاره، دارای آب و هوای خشک و بیابانی و مقادیر کم ریزش‌های جوی است (Hoseceni et al., 2020) و از سوی دیگر این شرایط خشن طبیعی به مدد جایگاه رشته کوه‌های البرز و زاگرس و همچنین دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب رو به تعدیل می‌رود (Masoudian, 2011). به جهت شرایط خاص جغرافیایی و آب و هوایی، همواره در ایران شاهد نقش‌آفرینی پدیده‌های طبیعی از دو منظر پدیده‌های مخرب و همچنین پدیده‌های مفید در سرتاسر این سرزمین هستیم. اما انسان و فعالیت‌های آن با دستکاری‌های سودجویانه خود نظم موجود در شرایط طبیعی را برهم زده است. فعالیت‌هایی در سطوح گسترده که فقط با هدف بهره‌کشی از منابع بدون توجه به نظام اکوسیستم منطقه، موجب تشدید اثرات مخرب پدیده‌هایی نظیر تغییرات آب و هوایی در مقیاس کلان شده است (Wells et al., 2004). یکی از پدیده‌های تغییرات آب و هوایی که بخش‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را دچار مخاطره و دگرگونی کرده خشکسالی است. خشکسالی هم یک مخاطره است و هم یک فاجعه؛ مخاطره است به این دلیل که به طور غیرقابل پیش‌بینی اتفاق می‌افتد و بخشی از تغییرپذیری طبیعی سیستم آب و هوایی است و فاجعه است چون با کاهش رژیم بارش در رابطه است و به کاهش ذخیره‌ی آب برای اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی و همچنین دیگر فعالیت‌های انسانی منجر می‌شود (Paulo et al., 2012). به عقیده بسیاری از متخصصان حوزه‌ی آب و هواشناسی، ایران امروز در مرکز شرایط بحران تنش‌زا از منظر کمبود منابع آب و پوشش گیاهی قرار گرفته است. به همین دلیل شناخت میزان، نوع، زمان، روند، تواتر-تناوب و گستره‌ی بارش و خشکسالی زمینه‌های پژوهشی وسیع و جالبی در آب و هواشناسی خشکسالی‌ها به‌ویژه در حوضه‌های

رودخانه‌ها یا پهنه‌های آب و هوایی خاص ایجاد کرده است. براساس گزارش سازمان ملل، در آینده‌ی نزدیک ۱۸ کشور جهان با کمبود آب مواجه خواهند شد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵، بیش از دو سوم جمعیت جهان در شرایط کمبود جدی آب قرار گیرند (Shabanali et al., 2020). با توجه به خسارات خشکسالی‌ها در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی و اقتصاد کشور، شناسایی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار و نیازمند توجه بیشتری در تصمیم‌گیری‌های سیاسی است. برای پایش خشکسالی تاکنون بیش از ۲۵۰ نمایه معرفی شده است که از آن جمله شاخص‌های فقط مبتنی بر عنصر بارش برای بررسی عمومی خشکسالی مناسب است. هرچند بارندگی نقش ویژه‌ای در تغییرات زمانی خشکسالی ایفا می‌کند، تأثیر درجه حرارت معنی‌دار است و موجب تشدید پدیده‌ی خشکسالی و در نهایت، کاهش شدیدتر منابع آب می‌شود. در حال حاضر، از شاخص شدت خشکسالی خودتنظیم پالمر (SC-PDSI) و شاخص بارندگی استانداردشده (SPI) در پایش خشکسالی جهانی و منطقه‌ای به طور گسترده استفاده می‌شود و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استانداردشده (SPEI) در حال تبدیل شدن به یک شاخص متداول برای ارزیابی خشکسالی است (Wang et al., 2015). نمایه شدت خشکسالی پالمر (PDSI) یکی از شناخته‌شده‌ترین، پیچیده‌ترین و بهترین سیستم‌های هشداردهنده و پیش‌آگاهی خشکسالی بوده و اولین نمایه جامع خشکسالی و یکی از روش‌های بسیار مؤثر در تعیین خشکسالی بلندمدت (چندماهه) است (Palmer, 1968). این نمایه در واقع یک مدل بیان آبی را برای مقدار رطوبت خاک منظور می‌نماید. اولین بار از آن به منظور توضیح علت گسترش سطحی و شدت خشکی در امریکای شمالی در ۱۹۶۰ استفاده شده است (Palmer, 1968). هدف پالمر ارائه شاخصی بود که بتواند خشکسالی را در زمان‌ها و مکان‌های مختلف با هم مقایسه و برآورد کند. این شاخص به جای آنکه صرفاً بر بارش تأکید داشته باشد، بر مدل توازن و تعادل آب اولیه استوار است. اساس و پایه این روش،

1. Standardized Precipitation Index

2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

این زمینه موفق دانستند (Miki et al., 2005). همچنین بررسی‌هایی در زمینه‌ی پاسخ PDSI به خشکی از نظر هیدرولوژیکی و هواشناسی در یونان انجام شده است و محققان قدرت این نمایه در تشخیص شدت خشکسالی در رخ داده‌های سال‌های دور را مناسب گزارش کردند (Vasiliades et al., 2009). در گزارشی (Azadi et al., 2018) به بررسی واسنجی شاخص خشکسالی پالم در ایران پرداختند و نتایج این گزارش نشان داد که سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ خشک‌ترین سال‌ها و سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ مرطوب‌ترین سال‌های مورد بررسی بوده است. همچنین در گزارشی (Darand, 2013) به پایش خشکسالی ایران به کمک شاخص شدت خشکسالی پالم و ارتباط آن با الگوهای پیوند از دور جوی-اقیانوسی پرداختند. نتایج نشان داد که شدیدترین خشکسالی ایران مربوط به سال ۲۰۰۰ در پهنه‌ی شمال غرب ایران است و ارتباط پیوند از دور فصل پاییز ارتباط بیشتری با خشکسالی‌های ایران نشان می‌دهد. شاخص‌های متعددی به منظور بررسی خشکسالی در ابعاد گوناگون ارائه شده‌اند که در آن‌ها، عناصر مختلفی برای تعیین خشکسالی استفاده شده است. دو عامل کلیدی در تعیین وقوع و شدت خشکسالی، بارش و تبخیر و تعرق است. مطالعات گذشته نشان داده است که استفاده از شاخص‌های فقط مبتنی بر عنصر بارش برای بررسی عمومی خشکسالی مناسب است (Fowler, 2007). بر اساس تحقیقات وندر و همکاران (Vander et al, 2006; 2013; 2007) با استفاده از شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالم در تابستان‌های اروپا (۲۰۰۶)، آمریکای شمالی (۲۰۰۶)، آلیپ اورپا (۲۰۰۷) و همچنین خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هر دو نیمکره شمالی و جنوبی (۲۰۱۳) و پایش خشکسالی جهانی را بررسی نمودند. در پژوهشی (Hosseini et al, 2020) سال‌های تر و خشک را در ایران با استفاده از شاخص GPCC در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹-۱۹۵۹ بررسی نمودند و نشان دادند که روند شدت و گستره‌ی خشکسالی‌ها افزایشی است. همچنین، شدیدترین خشکسالی‌ها در دوره‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه از سال ۲۰۰۰ به بعد رخ داده است. الگوی تغییرات فضایی شدت خشکسالی نشان‌دهنده‌ی دو کانون اصلی خشکسالی در جنوب شرق و مرکز ایران است و تعداد

تفاوت بین مقدار بارش مورد نیاز برای تراز نرمال آب و میزان بارش واقعی است. شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالم^۱ (sc-PDSI) با جایگزینی محاسبه شاخص آماری تجربی با مقادیر محاسبه‌شده دینامیکی، به طور خودکار رفتار شاخص را در هر مکان خودواسنجی می‌کند. با محاسبه‌ی عوامل دینامیکی آب و هوایی، تأثیر کلی خودواسنجی شاخص شدت خشکسالی بر اساس مشخصات واقعی یک مکان معین، توسط شاخص در تعریف PDSI نشان داده می‌شود. شاخص خشکسالی scPDSI توسط ولز و همکاران (Wells et al., 2004) معرفی شد که نوعی از نسخه اصلی PDSI (Palmer, 1965) است و با هدف مقایسه نتایج حاصل از رژیم‌های مختلف آب و هوایی همانند PDSI، از سری زمانی بارش و دما همراه با پارامترهای ثابت مربوط به مشخصات خاک/سطح در هر مکان محاسبه می‌شود. از طریق پژوهش‌های مختلف در مناطق مختلف ایالات متحده، scPDSI نشان می‌دهد که از نظر مکانی با PDSI قابل مقایسه است و شرایط مرطوب و خشک شدید را با فرکانس‌هایی که برای شرایط حساس انتظار می‌رود گزارش می‌نماید. دامنه‌ی مقادیر scPDSI نزدیک به دامنه‌ی مقادیر زیر ۴- و بالاتر از ۴ نمایانگر شرایط رخداد فرین (شدید) هستند. حساسیت شاخص PDSI بر اساس آب و هوای محلی است و البته شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی (scPDSI) حساسیت‌های مختلف به کمبود رطوبت را ندارد. به منظور بهبود قابلیت پیوند و مقایسه‌ی پراکندگی مکانی شاخص شدت خشکسالی پالم PDSI، پژوهشگران علوم جو و محققان، scPDSI را پیشنهاد نمودند که می‌تواند به طور خودکار آب و هوای محلی را اصلاح نماید. ویر و همکاران (veber et al., 1998) به محاسبه‌ی نمایه‌های خشکسالی معرفی شده توسط پالم پرداخته و نشان دادند رابطه‌ی خوبی بین مقادیر نمایه و بارندگی تجمعی سالانه در منطقه مورد مطالعه آنان وجود دارد. همچنین نشان دادند که نمایه خشکسالی هواشناسی پالم یک ماه سریع‌تر از نمایه هیدرولوژیکی پالم به تغییرات رطوبتی واکنش نشان می‌دهد. بررسی توان PDSI در نمایش رطوبت خاک در یکی از کشورهای اروپایی پرداخته شد و آن را در

1. Self-calibrating Palmer Drought Severity Index

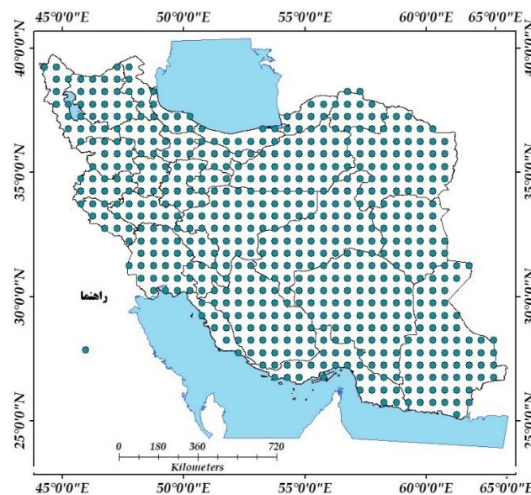
خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر برای کل کشور
واسنجی و بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در سطح جهان، چندین پایگاه داده وجود دارد که متغیرها و شاخص‌های مختلف آب و هوایی را در دوره‌های گذشته یا آینده برای کل جهان ارائه می‌کنند. در این میان، پایگاه داده جهانی "واحد تحقیقات آب و هوایی" (CRU) دانشگاه انگلیس شرقی انگلستان به آدرس [https://drought/data/cru/uk.ac.uea.crudata/](https://drought.data/cru/uk.ac.uea.crudata/) داده‌های خشکسالی محاسبه شده و با استفاده از شاخص SC-PDSI با قدرت تفکیک ۰/۵ در ۰/۵ درجه ارائه کرده‌اند (Michel et al, 2005). این داده‌ها هر ساله با استفاده از نسخه‌های جدیدتر داده‌های ورودی CRU TS به روز می‌شوند و در حال حاضر با استفاده از نسخه اولیه CRU TS 4.04 تا پایان سال ۲۰۱۹ موجود است. در این پژوهش، شاخص خشکسالی پالمر برای کل کشور واسنجی و بررسی می‌شود (شکل ۱).

مراکز خشکسالی در ایران نیز با گذشت زمان افزایش یافته است. همچنین در پژوهشی دیگر (Mojarad et al., 2021) به ارزیابی تغییرات خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص SPEI و scPDSI پرداختند که نتایج آن‌ها نشان داد که بر اساس محاسبات، در هر دو شاخص بیشترین درصد سال‌ها تحت سیطره‌ی طبقه‌ی نرمال با تمرکز هسته‌های بیشینه نرمال در نیمه‌ی شرقی کشور و کمترین درصد سال‌ها در طبقه‌ی خشکسالی بسیار شدید با تمرکز هسته‌های بیشینه در نیمه‌ی غربی، مرکز و جنوب کشور بوده است. دوره‌ی آغاز خشکسالی با شاخص PDSI-SC سال ۱۹۹۹ و همچنین شاخص SPEI سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ بوده است. خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید در بخش‌هایی از کشور که از وضعیت بارشی نسبتاً مناسب‌تری برخوردار هستند، اتفاق افتاده است. از آنجایی که شاخص پالمر در مطالعات گسترده‌ای کاربرد دارد و با توجه به لزوم بررسی و ارزیابی خشکسالی و ترسالی در مناطق آب و هوایی مختلف ایران، در این پژوهش، شاخص



شکل ۱. پراکنش سلول‌های شاخص شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) در سطح استان‌های مورد بررسی

Fig 1. Distribution of Palmer Drought Severity Index (scPDSI) at the investigated provinces

رطوبت (R)، نگهداشت رطوبت بالقوه (PR)، رواناب (RO)، رواناب بالقوه (PRO)، اتلاف رطوبت (L)، اتلاف رطوبت بالقوه (PL) است. مقادیر این مؤلفه‌ها ارتباط بسیار نزدیکی با ظرفیت آب در دسترس دارند. scPD-SI با استفاده از برنامه توسعه‌یافته توسط محققان

روش محاسبه شاخص شدت خشکسالی پالمر به این صورت است که برای هر ماه از سال جداگانه مقادیر چهار مؤلفه مرتبط با رطوبت خاک همراه با مقادیر بالقوه آن مورد نیاز است. هشت مؤلفه شامل تبخیر و تعرق (ET)، تبخیر و تعرق بالقوه (PE)، نگهداشت

خشکسالی نیوار ایران بر اساس شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی (scPDSI) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۱) طبقات شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر ارائه شده است.

دانشگاه نبراسکا محاسبه شده است. اخیراً گزارش شده است که شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی PDSI با حفظ یک رفتار سازگارتر از شاخص شدت و مقایسه با مناطق مختلف آب و هوایی، شاخص شدت خشکسالی پالمر را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش

جدول ۱. طبقات شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI)

Table 1. Palmer Drought Severity Index (scPDSI) classes

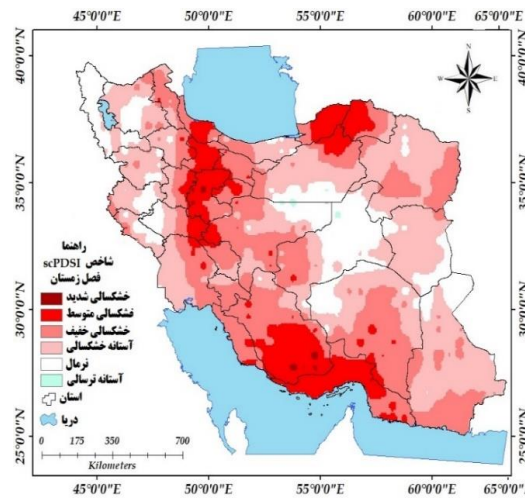
مقادیر شاخص Index values	طبقات شاخص خودواسنجی خشکسالی پالمر Drought severity scPDSI	ردیف Row
> 4	ترسالی بسیار شدید Extremely wet	1
3 : 4	ترسالی شدید Sever wet	2
2 : 3	ترسالی متوسط Moderately wet	3
1 : 2	ترسالی خفیف Mild fear	4
0.5 : 1	آستانه ترسالی Terrible threshold	5
-0.5 : 0.5	نرمال Normal	6
-1 : 0.5	آستانه خشکسالی Threshold drought	7
-2 : -1	خشکسالی خفیف Mild drought	8
-3 : -2	خشکسالی متوسط Moderately drought	9
-4 : -3	خشکسالی شدید Severe drought	10
< -4	خشکسالی بسیار شدید Very severe drought	11

شکل (۳) مشاهده شد که روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل زمستان بر اساس عرض جغرافیایی از عرض‌های پایین تا عرض ۳۰ درجه شمالی بیش‌ترین شدت خشکسالی را داشته است.

با توجه به شکل (۴) و جدول (۳)، فصل پاییز با ۰/۱۴ درصد مساحت (۲۳۳۶/۰۷ کیلومتر مربع) در خشکسالی‌های شدید، ۱۳/۷۷ درصد مساحت (۲۲۴۱۸۰/۵۶) خشکسالی متوسط، ۴۴/۳۰ درصد مساحت (۷۲۱۰۹۹/۵۴) خشکسالی خفیف قرار داشته است. به طور کلی، فصل پاییز کشور ایران با توجه با شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۸۶/۴۷ درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۱۳/۵۳ درصد در

نتایج و بحث

با توجه به شکل (۲) و جدول (۲)، نتایج این پژوهش نشان داد، خشکسالی کشور ایران در بازه‌ی زمانی ۴۰ سال (۱۹۷۹-۲۰۱۸)، با توجه به شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI)، فصل زمستان با ۲۰/۰ درصد مساحت (۸۰/۳۴۰۴ کیلومتر مربع) در خشکسالی‌های شدید، ۸۲/۱۳ درصد مساحت (۲۲۵۰۰۹/۵۰) خشکسالی متوسط، ۳۲/۳۱ درصد مساحت (۵۲۵۹۴۲/۹۹) خشکسالی خفیف قرار داشته است. به طور کلی، فصل زمستان کشور ایران با توجه با شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۸۴/۰۸ درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۱۵/۸۸ درصد در شرایط ترسالی واقع شده است. همچنین با توجه به

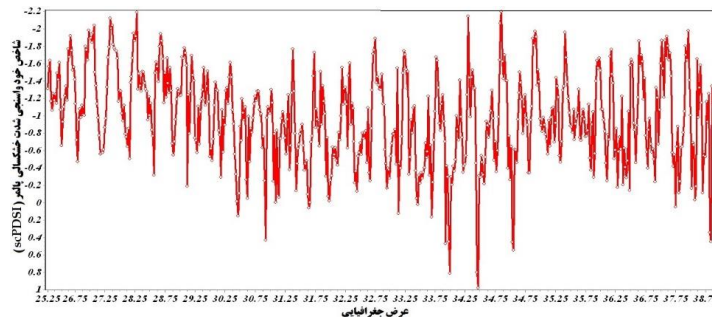


شکل ۲. شاخص خودارسنجی شدت خشکسالی پالم (scPDSI) فصل زمستان
 Fig 2. Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in winter season

جدول ۲. درصد مناطق تحت پوشش شاخص خودارسنجی شدت خشکسالی پالم (scPDSI) فصل زمستان

Table 2. Percentage of areas covered by the Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in the winter season

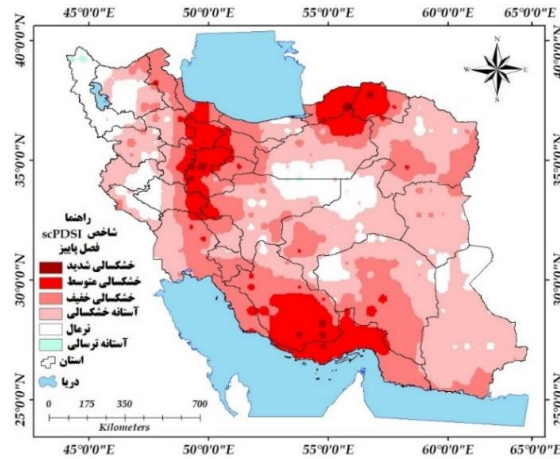
ردیف Row	طبقات شاخص خشکسالی Drought severity	مساحت (کیلومتر مربع) Area(km)	درصد (%) Percent(%)
1	خشکسالی شدید Severe drought	3404.80	0.20
2	خشکسالی متوسط Moderately drought	22500.50	13.82
3	خشکسالی خفیف Mild drought	525942.99	32.31
4	آستانه خشکسالی Threshold drought	614449/86	37.75
5	نرمال Normal	257123	15.79
6	آستانه ترسالی Terrible threshold	1591.73	0.097



شکل ۳. روند شاخص خودارسنجی شدت خشکسالی پالم (scPDSI) فصل زمستان بر اساس عرض جغرافیایی
 Fig 3. Trend of Palmer's Self-Assessment Drought Severity Index (scPDSI) in winter season by latitude

فصل زمستان بر اساس عرض جغرافیایی از عرض‌های پایین تا عرض ۳۰ درجه شمالی بیشترین شدت خشکسالی را داشته است.

شرایط ترسالی واقع شده است. همچنین با توجه به شکل (۵) مشاهده شد که روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل پاییز همانند

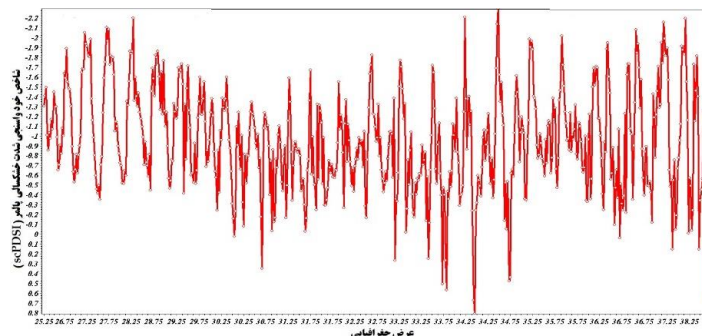


شکل ۴. شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل پاییز
 Fig 4. Palmer's Self-Assessment Drought Severity Index (scPDSI) in fall season

جدول ۳. درصد مناطق تحت پوشش شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل پاییز

Table 3. Percentage of areas covered by the Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in the fall season

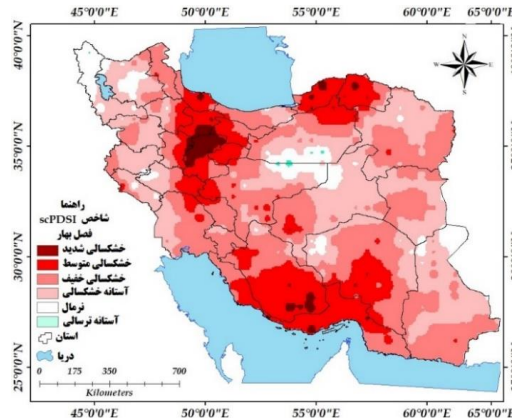
ردیف Row	طبقات شاخص خشکسالی Drought severity	مساحت (کیلومتر مربع) Area(km)	درصد (%) Percent(%)
1	خشکسالی شدید Severe drought	2336.07	0.14
2	خشکسالی متوسط Moderately drought	224180.56	13.77
3	خشکسالی خفیف Mild drought	721099.54	44.30
4	آستانه خشکسالی Threshold drought	455239.13	27.96
5	نرمال Normal	218078.06	13.39
6	آستانه ترسالی Terrible threshold	6764.31	0.41



شکل ۵. روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل پاییز بر اساس عرض جغرافیایی
 Fig 5. Trend of Palmer's Self-Assessment Drought Severity Index (scPDSI) in autumn by latitude

مساحت در شرایط خشکسالی و ۶/۴۶ درصد در شرایط ترسالی واقع شده است. همچنین با توجه به شکل (۷) مشاهده شد که روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمِر (scPDSI) فصل بهار بر اساس عرض جغرافیایی از عرض‌های پایین تا عرض ۳۰ درجه شمالی بیشترین شدت خشکسالی را داشته است.

با توجه به شکل (۶) و جدول (۴)، فصل بهار با ۰۲/۲ درصد مساحت (۳۲۹۱۳/۶۰ کیلومتر مربع) در خشکسالی‌های شدید، ۲۰/۵۸ درصد مساحت (۳۳۵۰۵۱/۰۳) خشکسالی متوسط، ۴۴/۳۰ درصد مساحت (۶۳۲۹۴۴/۰۹) خشکسالی خفیف قرار داشته است. به طور کلی، فصل بهار کشور ایران با توجه به شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۹۳/۵۳ درصد



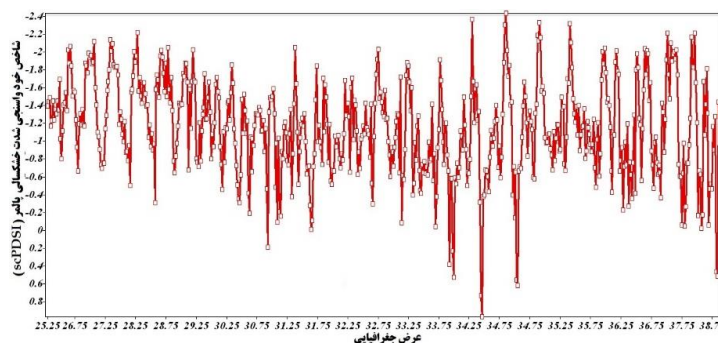
شکل ۶. شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمِر (scPDSI) فصل بهار

Fig 6. Palmer's Self-Assessment Drought Severity Index (scPDSI) in spring

جدول ۴. درصد مناطق تحت پوشش شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمِر (scPDSI) فصل بهار

Table 4. Percentage of areas covered by the Palmer Drought Severity Self-Assessment Index (scPDSI) in the spring season

درصد (%) Percent (%)	مساحت (کیلومترمربع) Area (km)	طبقات شاخص خشکسالی Drought severity	ردیف Row
2.02	32913.60	خشکسالی شدید Severe drought	1
20.58	335051.03	خشکسالی متوسط Moderately drought	2
38.89	632944.09	خشکسالی خفیف Mild drought	3
32.02	521256.83	آستانه خشکسالی Threshold drought	4
6.40	104245.96	نرمال Normal	5
0.06	1072.35	آستانه ترسالی Terrible threshold	6

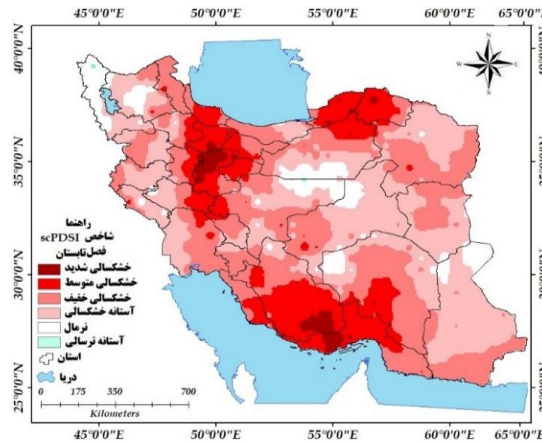


شکل ۷. روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمِر (scPDSI) فصل بهار بر اساس عرض جغرافیایی

Fig 7. The trends of the Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in the spring by latitude

درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۷/۳۱ درصد در شرایط ترسالی واقع شده است. همچنین با توجه به شکل (۹) مشاهده شد که روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل تابستان بر اساس عرض جغرافیایی از عرض‌های پایین تا عرض ۳۰ درجه شمالی بیشترین شدت خشکسالی را داشته است.

با توجه به شکل (۸) و جدول (۵)، فصل تابستان با ۲۲/۲ درصد مساحت (۳۶۲۸۵/۱۰ کیلومتر مربع) در خشکسالی‌های شدید، ۱۷/۹۰ درصد مساحت (۲۹۱۴۵۱/۸۱) خشکسالی متوسط، ۳۶/۴۳ درصد مساحت (۵۹۳۲۲۷/۷۰) خشکسالی خفیف قرار داشته است. به طور کلی، فصل تابستان کشور ایران با توجه به شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۹۲/۶۱

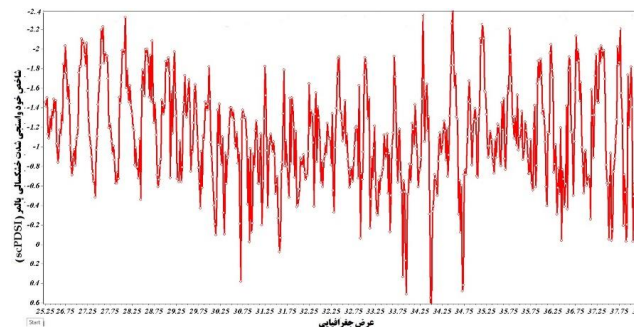


شکل ۸. شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل تابستان
 Fig 8. Palmer drought severity index (scPDSI) in summer season

جدول ۵. درصد مناطق تحت پوشش شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل تابستان

Table 5. Percentage of areas covered by the Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in the summer season

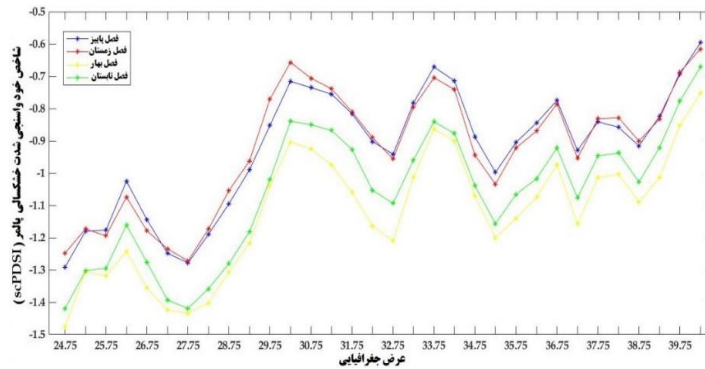
ردیف Row	طبقات شاخص خشکسالی Drought severity	مساحت (کیلومتر مربع) Area (km)	درصد (%) Percent (%)
1	خشکسالی شدید Severe drought	36285.10	2.22
2	خشکسالی متوسط Moderately drought	291451.81	17.90
3	خشکسالی خفیف Mild drought	593227.70	36.43
4	آستانه خشکسالی Threshold drought	587790.39	36.10
5	نرمال Normal	118603.85	7.28
6	آستانه ترسالی Terrible threshold	650.35	0.03



شکل ۹. روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمر (scPDSI) فصل تابستان بر اساس عرض جغرافیایی
 Fig 9. Trend of the Palmer Self-Assessment Drought Severity Index (scPDSI) in the summer season by latitude

خودواسنجی شدت خشکسالی پالمیر (scPDSI) بر اساس عرض جغرافیایی از عرض‌های پایین تا عرض ۳۳/۷۵ درجه شمالی بیشترین شدت خشکسالی را داشته است.

با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که مقایسه روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمیر (scPDSI) کشور ایران، در فصل بهار و تابستان بیشترین خشکسالی را نسبت به فصل‌های پاییز و زمستان نشان می‌دهد. به طور کلی روند شاخص



شکل ۱۰. مقایسه روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمیر (scPDSI) فصل تابستان، بهار، زمستان و پاییز بر اساس عرض جغرافیایی

Fig 10. Comparison of Palmer Drought Intensity Index (scPDSI) trend in summer, spring, winter and autumn according to latitude

قرار داشته است. فصل بهار با ۹۳/۵۳ درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۶/۴۶ درصد در شرایط ترسالی قرار داشته است. فصل تابستان کشور ایران با توجه با شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۹۲/۶۱ درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۷/۳۱ درصد در شرایط ترسالی قرار داشته است. مقایسه‌ی روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمیر (scPDSI) کشور ایران، حاکی از وقوع بیشترین خشکسالی در فصل بهار و تابستان نسبت به فصل‌های پاییز و زمستان است. روند شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی پالمیر (scPDSI) بر اساس عرض جغرافیایی از عرض‌های پایین تا عرض ۳۳/۷۵ درجه شمالی بیشترین شدت خشکسالی را نشان می‌دهد.

منابع

- Azadi, S., Soltani, S., Transborder, M., & Pourmanafi, S. (2017). *Palmer drought index calibration in Iran, Iran Water Research Journal*, 12(2), 19-28. [In Persian].
- Hosseini Seddiq, S.M. (1400). *Hadley Cell Dynamics Climatology*, Sokhon Gostar Publications. [In Persian].
- Darend, Mohammad. (2013). *Monitoring Iran's drought using Palmer's drought severity index and its relationship with atmospheric-oceanic*

نتیجه‌گیری

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی است، که بیش از هر مخاطره‌ی دیگر انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تقریباً در تمامی مناطق آب و هوایی اتفاق می‌افتد و سالانه بیش از نیمی از کره زمین در معرض خشکسالی قرار دارد. با این حال نمود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر است. در این پژوهش از شاخص scPDSI و داده‌های با تفکیک مکانی ۰/۲۵*۰/۲۵ درجه جهت بررسی خشکسالی و ترسالی طی دوره‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ استفاده شده است. نتایج نشان داد شهرهای بجنورد، مانه و سملقان، گرگان، شاهرود، تهران، قزوین، اراک، همدان، کاشان، بندرلنگه، فسا، بندرعباس و غرب خرم‌آباد دچار خشکسالی‌های شدید تا متوسط شده‌اند؛ که این خشکسالی‌ها در فصل بهار با ۲۲/۰۶ درصد و در تابستان با ۲۰/۱۲ درصد ایران را فرا گرفته است. به طور کلی نتایج نشان داد که در فصل زمستان کشور ایران با توجه با شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۸۴/۰۸ درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۱۵/۸۸ درصد در شرایط ترسالی قرار داشته است. فصل پاییز با توجه با شاخص خودواسنجی شدت خشکسالی، ۸۶/۴۷ درصد مساحت در شرایط خشکسالی و ۱۳/۵۳ درصد در شرایط ترسالی

- 1481–1491.
- Van der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, KR., & Jones, PD. (2013). *A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901-2009*. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 4025-4048 ,10.1002/jgrd.50355.
- Van der Schrier, G., Barichivich, J., Harris, I., Jones, PD., & Osborn, TJ. (2015). Monitoring global drought using the self-calibrating Palmer Drought Severity Index [in “State of the Climate in 2014”]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96, S30-S31.
- van der Schrier, G., Briffa, KR., Jones, PD., & Osborn, TJ. (2006a). Summer moisture variability across Europe. *Journal of Climate* 19, 2818-2834, doi:10.1175/JCLI3734.1.
- Van der Schrier, G., Briffa, KR., Osborn, TJ., & Cook, ER. (2006b). Summer moisture availability across North America. *Journal of Geophysical Research* 111, D11102 ,doi:10.1029/2005JD006745.
- Van der Schrier, G., Efthymiadis, D., Briffa, KR., & Jones, PD. (2007). European Alpine moisture variability for 1800-2003. *International Journal of Climatology* 27, 415-427 doi:10.1002/joc.1411.
- Vasiliades, L., & Loukas, A. (2009). Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece. *Desalination*. 237, 3–21.
- Wang, K. Y., Li, Q. F., Yang, Y., Zeng, M., Li, P. C., & Zhang, J. X. (2015). Analysis of Spatio-Temporal Evolution of Droughts in Luanhe River Basin Using Different Drought Indices. *Water Science and Engineering*, 8(4): 282-290.
- Weber, L., & Nkemdirim, L. (1998). Palmer’s drought-indices revisited. *Geogr. Ann.*, 80 A (2). 153–172.
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, MJ. (2004). *A self-calibrating Palmer Drought Severity Index*. *Journal of Climate*, 17, 2335-2351.
- distance patterns, *Geographical Research Quarterly, Chehram issue, winter season*, serial number 115. [In Persian].
- Shabanali Femi, H., Savari, M., Motaghd, M., Mohammadzade Nasrabadi, M., Afshari, M., & Beqaei, Moseeb. (2019). analysis of adaptation strategies of small-scale farmers to drought conditions in Isfahan province, *Amash and Space Planning Quarterly*, 24(1), 47-21. [In Persian].
- Mojarad, F., Khairi, R., Masoumpour, J., & Farhadi, B. (2020). evaluation of drought changes in Iran using SPEI and sc-PDSI indices, *Planning and Space Planning*, 25(1), 143-174.
- Masoudian, A. (2011). Climate of Iran, Sharia Tos Publications. [In Persian].
- Barichivich, J., Osborn, TJ., Harris, I., Van der Schrier, G., & Jones, PD. (2020). Drought [in “State of the Climate in 2019”]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, S1-S429. doi:10.1175/2020 BAMS State of the Climate.1.
- Hosseini, A., Ghavidel, Y., Khorshiddoust, A. M. & Farajzadeh, M. (2020). Spatio-temporal Analysis of Dry and Wet Periods in Iran by Using Global Precipitation Climatology Center - Drought Index (GPCC –DI), *Theoretical and Applied Climatology*, Published online 24 November 2020, 1-11. [In Persian].
- Mika, J., Horva,‘th Sz., Makra, L., & Dunkel, Z. (2005). The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture. *Physics and Chemistry of the Earth*. 30. 223–230.
- Mitchell, TD., & Jones, PD. (2005). An improved method of constructing database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25, 693-712, doi:10.1002/joc.1181.
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. U.S. Department of Commerce, *Weather Bureau Research Paper* 45, 58.
- Palmer, W.C. (1968). Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: The New Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21(4), 156–161.
- Paulo, A. A., Rosa1, R. D. & Pereira, L. S. (2012). Climate Trends and behavior of Drought Indices Based on Precipitation and Evapotranspiration in Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12:



Simulation of the Growth of Quinoa with Using DSSAT 4.7 Model in Field Conditions

Shahab Eghbali Shahabad^{1*}, Mehdi Nassiri-Mahallati², Mohsen Jahan³, Mohammad Hassan Fallah⁴

1. Agricultural Expert, promotion and education of Yazd province, Yazd, Iran.
2. Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Associated Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4. Graduated PhD of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author: sh_weed@yahoo.com

Keywords:

Arid Area, Modeling,
Phenological development,
Planting date.

Extended abstract

Introduction

Climate change is rapidly degrading the conditions of crop production. For instance, increasing salinization and aridity are forecasted to increase in most parts of the world. As a consequence, new stress-tolerant species and genotypes must be identified and used for future agriculture. Stress-tolerant species exist but are underutilized and neglected. Quinoa (scientifically known as *Chenopodium quinoa* Willd) is a member of the Amaranthaceous family. Promoting the cultivation and nutrition of quinoa will diversify food products in the country, sustainable production increases farmers' incomes and provide part of the community's food needs. Crop simulation models have been used for various studies such as selecting the appropriate cultivar, determining the best planting date, predicting the effect of diversity and climate change on growth. Field research experiments are time-consuming and not cost effective. In contrast, it requires a lot of time and money, while computer simulation models can save time and money by conducting extensive experimental simulations.

Materials and Methods

This research was conducted in two regions of Yazd province with 10 separate experiments in the form of a randomized complete block design with three replications. Experimental factors included 5 promising modified lines at Yazd Salinity Research Center with the Titicaca cultivar. The lines consisted of four intermediate maturity lines, numbered 1 (NSRCQE), 2 (NSRCQC), 3 (NSRCQD), and 6 (NSRCQA), one

Received:

20 September 2023

Revised:

15 November 2023

Accepted:

23 November 2024

How to cite this article:

Eghbali Shahabad, S., Nassiri-Mahallati, M., Jahan, M., & Fallah, M.H. (2024). Simulation of the growth of Quinoa with Using DSSAT 4.7 Model in Field Conditions. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 107-124. [10.22077/JDCR.2023.6801.1045](https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6801.1045)



late maturity line numbered 4 (NSRCQB), and the early maturity cultivar Titicaca numbered 5. Sampling and note-taking were performed regularly, once every three days, in proportion to the progress of the phenological stages of each line. The simulation of quinoa growth and development was done with DSSAT 4.7 software. The model was calibrated and evaluated with data collected from the field. Before running the model, modified coefficients were used by Prager et al(2019).

Results and Discussion

The critical photoperiod parameter (CSDL) was estimated to be 13.8 hours in the early variety, 13.7 hours in the medium clay lines and 12.5 hours in the late line. The sensitivity of lines to photoperiod (PPSEN) varied from 0.22 to 0.25. The time interval between the appearance of the first seed (R5) and physiological ripening (R7) in different lines was very different, so that in the late line 4, 35 days, in the medium lines 1, 2 and 3, 27 days and in the early variety of Titicaca, 25 days was estimated. The results of calibration and validation of the CROPGRO model with DSSAT 4.7 software were evaluated as optimal for budding, flowering and maturity stages of quinoa. For the number of days from planting to flowering, the value of the root mean square error (RMSE) was in the range of 3.5 to 6.4 days, the coefficient of variation or the percentage of RMSE (CV) was in the range of 7.3 to 11.3%, Wilmot's index of agreement (d) in the range of 0.74 to 0.96, the average deviation from the model (MB) was in the range of -0.83 to 1.5 and the explanation coefficient (R²) was in the range of 0.47 to 0.85. Therefore, the model estimates flowering stage very well. In different quinoa lines, the maximum difference between simulated and observed data of days to budding, flowering, and physiological maturity was 2 days, which indicates good prediction of the CROPGRO model. The optimal planting date for lines 3, 4, 5, and 6 is the first of August, the end of July, the middle of August, and the end of July, respectively, because it is the shortest growing period.

Conclusion

The results of calibration and validation of CROPGRO model with DSSAT software were evaluated as favorable for quinoa and the 30-year seasonal analysis of the model for the city of Yazd showed that the optimal planting dates for lines 3, 4, 5 and 6 are the first of August, the end of July, and the middle of It is August and the end of July because it is the shortest period of growth. Considering that this model can integrate the complex interactions of soil properties, climatic conditions, management practices and genetic characteristics of the product, it leads to a better understanding of the complex interactions between factors affecting the growth and development of this plant, so it can be used to develop studies on the aspect different types of quinoa ecophysiology should be used in research departments.



شبیه‌سازی رشد و نمو کینوا در مناطق خشک با نرم‌افزار DSSAT 4.7 در شرایط مزرعه

شهاب اقبالی شاه آباد^{۱*}، مهدی نصیری محلاتی^۲، محسن جهان^۳، محمد حسن فلاح^۴



۱. کارشناس جهاد کشاورزی استان یزد، یزد، ایران.
۲. استاد گروه آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۳. دانشیار گروه آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۴. دانش آموخته دکتری آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*نویسنده مسئول: sh_weed@yahoo.com

چکیده

واژه‌های کلیدی:

ایران کشوری وسیع با جمعیت رو به افزایش است و استفاده از دانه اصلاح‌شده گیاهان مقاوم با خاک‌های خشک و شور مانند کینوا در کنار گیاهان استراتژیک، با به‌کارگیری ابزارهای دانش‌بنیان در مدیریت زراعی و به‌نژادی مانند مدل‌ها، قادر خواهد بود تولید غذا را در کشورمان متناسب با افزایش جمعیت تغییر دهد. این تحقیق در سال ۱۳۹۸ و در دو منطقه از استان یزد با ۱۰ آزمایش جداگانه و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های آزمایش شامل ۵ لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد و یک رقم به نام تی تی کاکا بود؛ که از کینوهای انتخاب شده چهار لاین متوسط‌ترس، یک لاین دیررس و یک رقم زودرس به نام تی تی کاکا بود. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. شبیه‌سازی رشد و نمو، واسنجی و ارزیابی رشد کینوا توسط مدل DSSAT 4.7 و با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه انجام شد. نتایج واسنجی و تعیین اعتبار مدل CROPGRO در مناطق خشک با نرم‌افزار DSSAT 4.7 برای کینوا مطلوب ارزیابی شد و بررسی تجزیه و تحلیل فصلی ۳۰ ساله مدل برای شهر یزد نشان داد که تاریخ کاشت مطلوب برای لاین‌های متوسط‌ترس، دیررس و رقم تی تی کاکا به ترتیب اول مرداد، آخر تیر و نیمه مرداد می‌باشد زیرا کوتاه‌ترین دوره رشد را در این تاریخ‌کاشت‌ها داشتند. نتایج نشان داد که روز تا غنچه‌دهی و روز تا گل‌دهی از تاریخ کاشت اول تیرماه تا تاریخ کاشت ۱۰ شهریور در همه لاین‌ها کاهش یافت به نحوی که در تاریخ کاشت اول تیرماه روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۴۱/۲، ۵۵، ۳۸/۲ و ۳۴/۸ روز و تاریخ کاشت ۱۰ شهریور روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۳۶/۱، ۳۵/۱، ۳۲/۳ و ۳۰/۶ روز بود. با توجه به اینکه دوره رشد کوتاه با عملکرد مناسب در مناطق خشک بعنوان مزیت محسوب می‌شود؛ بنابراین انتخاب تاریخ کاشت گیاهان زراعی با دوره کوتاه رشد به کمک مدل و با هزینه کم قابل انجام است.

تاریخ کاشت، نمو فنولوژیک، مدل‌سازی، مناطق خشک

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۶/۲۹

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۹/۰۲

مقدمه

اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی و به تبع آن بر رشد و نمو گیاهان متفاوت است و باعث نگرانی‌هایی در مورد تغییر رفتار گیاهان شده است. امنیت غذایی و ضربب اطمینان تولید غذا در سطح جهانی با ایجاد نوسانات دمایی در کوتاه‌مدت در ترکیب با دوره‌های خشکسالی بلندمدت، شوری خاک‌ها و سیل به خطر افتاده است (Hinojosa et al., 2018). با افزایش تنوع گیاهانی که ظرفیت بالایی در برابر تغییرات اقلیمی دارند، امکان افزایش دسترسی به غذای با کیفیت فراهم خواهد شد. ایران کشوری وسیع با جمعیت رو به افزایش است و تأمین نیاز غذایی مردم با استفاده از پتانسیل تولید محصولات زراعی و گیاهان جدید از مهم‌ترین وظایف بخش کشاورزی به‌شمار می‌رود. کینوا (*Chenopodium quinoa, Willd*) از خانواده تاج‌خروسیان، یک محصول شبه غله با قابلیت‌های بالا برای کشت در اغلب مناطق جهان به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این گیاه بسیار مقاوم به شرایط نامطلوب محیطی است که در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده مقاومت بالایی را از خود نشان می‌دهد. فائو از سال ۲۰۱۳، بومی‌سازی این گیاه را در مناطق فقیر، مناطقی که سایر گیاهان رایج در زراعت قابلیت گسترش ندارند، برجسته کرده است (Bazile et al., 2014). اولین قدم برای مطالعه این گیاه در محیط جدید بررسی فنولوژی آن است.

تشعشع، آب، عناصر غذایی، دما و طول‌روز از مهمترین عوامل محیطی هستند که بر مراحل نمو فنولوژیک در گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارند. اثر این عوامل به طور مشخصی بین فرآیندهای نموی و رشدی متفاوت است. مهمترین عوامل محیطی مؤثر بر نمو فنولوژیک در شرایط عدم محدودیت آب، دما و طول‌روز می‌باشند (Bertero, 2003).

معرفی یک گیاه زراعی به یک منطقه جدید ممکن است حامل یک‌سری مشکلات از قبیل ناسازگاری بین ژنوتیپ‌ها و شرایط محیطی باشد (Ceccato et al., 2011)؛ که با آزمایشات میدانی قابل شناسایی هستند. در مناطقی که دارای اقلیم با رژیم رطوبتی خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد

می‌باشند، کشت بهاره گیاه کینوا توصیه شده است (Salehi and Dehghany, 2017). با توجه به اقلیم و رقم، امکان کشت زود بهاره، تابستانه و پاییزه کینوا در مناطق مختلف کشور وجود دارد. وقوع دمای بالا طی گل‌دهی، طول دوره آزادسازی و بقای دانه‌ی گرده و زمان دریافت دانه‌ی گرده توسط گل را کوتاه می‌کند. نقش دما بسته به نوع واریته و یا نوع کاربرد گیاه کینوا (تولید دانه یا علوفه) متفاوت است (Murphy and Matanguihan., 2015). بنابراین توانایی گیاه برای تطبیق مراحل حساس نموی با شرایط عدم تنش در طول فصل رشد می‌تواند سبب فرار گیاه از تنش‌های محیطی شود (Bunce, 2018; Hinojosa et al., 2019). تاریخ کاشت یک ابزار مدیریتی مهم در به حداقل رساندن جنبه‌های منفی دمای بالا و تنش رطوبت در طی دوره‌های گل‌دهی و پر شدن دانه‌ی گیاهان است و تأخیر در کاشت می‌تواند سبب کاهش عملکرد دانه شود (Hirich et al., 2014).

مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی که رشد گیاه، مصرف آب و عملکرد را پیش‌بینی می‌کنند، با اهدافی نظیر درک واکنش گیاهان زراعی به تغییرات سیستم اقلیم-گیاه-آب، ارزیابی صفات فیزیولوژیک جهت بهبود ژنتیکی عملکرد و کمک به تصمیم‌سازی‌ها جهت بهینه‌سازی استفاده از منابع قابل دسترس، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Soltani et al., 2006). امروزه از مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی راهبردهای مختلف مدیریت زراعی و به‌نژادی در راستای بهینه‌سازی استفاده از منابع موجود استفاده می‌شود؛ همچنین با استفاده از این مدل‌ها، هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و علاوه بر آن می‌توان با این مدل‌ها به جای چند سال آزمایش در مزرعه، با کمک آمار هواشناسی بلندمدت گیاه مورد نظر را چندین سال با استفاده از مدل کاشت کرد و نتایج آن را مورد ارزیابی قرار داد (Soltani and Hoogenboom., 2007). از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی، تعیین بهترین مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد، عملکرد محصول و تخمین عملکرد

شرایط متفاوت محیطی و اقلیمی پیش‌بینی نمایند (Soltani et al., 2006; Yin et al., 2005). محققین به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای رشد و نمو کینوا از مدل CSM-CROPGRO، که زیرمجموعه مدل‌های DSSAT می‌باشد، برای واسنجی و ارزیابی استفاده نمودند. با توجه به این‌که DSSAT 4.7 مدلی برای کینوا نداشت، از مدل سویا (CROPGRO-Soybean) استفاده شد (Präger et al., 2019). هدف از این مطالعه واسنجی و ارزیابی مدل CROPGRO-Soybean در نرم‌افزار DSSAT 4.7 و تعیین ضرایب ژنتیکی مراحل نموی کینوا برای مناطق خشک در این مدل می‌باشد تا به‌عنوان یک ابزار مناسب در دسترس سایر محققین جهت تحقیقات بیشتر در مطالعات مربوط به سازگاری گیاه جدید کینوا در ایران قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

این پژوهش در دو نقطه از استان یزد (شهر یزد منطقه ۱ با ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا و روستای ارنان منطقه ۲ با ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا) طبق زمان‌بندی جدول ۱ اجرا شد (شکل ۱). فاصله این دو نقطه از هم ۱۰۰ کیلومتر است. آزمایش اول در مزرعه شخصی کشاورزی در شهر یزد با طول و عرض جغرافیایی $31^{\circ}55'$ و $54^{\circ}21'$ در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و آزمایش دوم در مزرعه شخصی کشاورزی در روستای ارنان یزد با طول و عرض جغرافیایی $31^{\circ}17'$ و $54^{\circ}14'$ در همان سال زراعی اجرا شد. نکته قابل توجه در تفاوت اقلیم دو منطقه یعنی اختلاف حداقل دماهای این دو ناحیه بین ۸ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و اختلاف حداکثر دماهای آن‌ها بین ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱). در مجموع محل آزمایش اول با اقلیم گرم و خشک و محل آزمایش دوم با اقلیم سرد و خشک انتخاب شد.

روش تحقیق:

تیمار آزمایشی شامل پنج لاین امید بخش اصلاح‌شده در مرکز تحقیقات شوری یزد به‌همراه رقم تی‌تی‌کاکا بود که در ۳ تکرار برای هر تاریخ کاشت اجرا شد. لاین‌ها شامل چهار لاین متوسط‌طرس که در این

بالقوه استفاده شده است (Soltani et al., 2006). نرم‌افزار DSSAT 4.7 یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری جامع برای ارزیابی مدیریت‌های مختلف کشاورزی است (Hoogenboom et al., 2004). این نرم‌افزار یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گیاهان زراعی است (برای بیش از ۲۰ گیاه زراعی مختلف) و برنامه‌های کامپیوتری در یک بسته نرم‌افزاری به‌منظور تسهیل در کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی در تحقیقات و تصمیمات جمع شده‌اند (Hoogenboom et al., 2004).

از عواملی که بر شفافیت یک مدل تأثیر می‌گذارد و روش مرسوم برای به‌کارگیری یک مدل می‌باشد، مسئله واسنجی مدل برای شرایط جدید است. بنابراین ابتدا مدل را واسنجی می‌نمایند. واسنجی یک مدل تغییر مداوم پارامترهای آن مدل جهت به حداقل رساندن اختلاف بین عملکرد برآورد شده (یا هر خروجی دیگر) توسط مدل با داده‌های واقعی است. مقادیر برآورد شده یک مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی، خاک، میزان آب مصرفی و دیگر نهاده‌های کشاورزی برداشت‌شده در یک ایستگاه تحقیقاتی بدست می‌آید. در اغلب موارد، برای رسیدن به نتایج مطلوب در شرایط مختلف، باید چند پارامتر (معمولاً با سعی و خطا) واسنجی شوند. دقت روش واسنجی عمدتاً به نوع و کیفیت داده‌های اندازه‌گیری‌شده بستگی دارد. برای برآورد دقیق تر ضرایب ژنتیکی ارقام، توصیه می‌شود که آزمایش بیش از چندین تاریخ کاشت در همان محل یا برای تاریخ کاشت یکسان در مکان‌های مختلف انجام شود (Hoogenboom et al., 2017). ارزیابی مدل روشی معمول در استفاده از مدل در یک محیط جدید و یا در چارچوب مدل‌سازی جدید است (Mathews et al., 2013; Zach et al., 2015).

متخصصان مدل‌سازی گیاهان زراعی اقدام به ارائه فرمول‌های کمی اکوفیزیولوژی برای تشریح پاسخ‌های فتوترمال فنولوژی (تأثیر همزمان دما و فتوپریود بر فنولوژی) نموده‌اند تا بتوانند زمان گل‌دهی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان زراعی را در



شکل ۱. موقعیت محل های اجرای طرح در استان یزد

Fig1. The location of the project implementation sites in Yazd province

جدول ۱. تاریخ های کاشت و میانگین ماهانه داده های هواشناسی محل های آزمایش در سال ۱۳۹۸

Table 1. Planting dates and monthly average of meteorological data in experimental sites

توضیحات	March	April	May	June	July	August	September	September	January	February
Explanation	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	اول شهریور	نیمه شهریور	مهر	بهمن	اسفند
Date of planting 1										
تاریخ کاشت یزد	29	29	28	28	26	23	6	20	29	29
Average maximum temperature	25.1	29.69	36.2	41.9	39.9	36.7	36.7	32	15.8	21.9
میانگین دماهای حداکثر										
Average minimum temperature	12.9	17.2	22.5	28.7	27.7	21.5	21.5	18	2.8	7.9
میانگین دماهای حداقل										
Average temperature	19	23.36	29.3	35.3	33.8	29.1	29.1	25	9.3	14.9
میانگین دما										
Average day length	12.47	13.37	13.9	13.9	13.3	12.4	12.4	11.44	10.65	11.5
میانگین طول روز										
Date of planting 2										
تاریخ کاشت ارنا	30	5 may	29	30	24	19	12	22	-	28
Average maximum temperature	18.3	23.66	30.9	36.2	34.5	32.2	32.2	27.26	11.2	16.8
میانگین دماهای حداکثر										
Average minimum temperature	5.6	8.3	14.8	21.1	17.9	14.4	14.4	10.4	-3.62	0.9
میانگین دماهای حداقل										
Average temperature	12	15.98	22.9	28.6	26.2	23.3	23.3	18.83	3.8	8.85
میانگین دما										
Average day length	12.46	13.35	13.9	13.9	13.3	12.4	12.4	11.45	10.67	11.52
میانگین طول روز										

آزمایش با شماره‌های ۱ (NSRCQE)، ۲ (NSRCQC)، ۳ (NSRCQD) و ۴ (NSRCQA)، یک لاین دیررس که با شماره ۴ (NSRCQB) و رقم زودرس تی‌تی‌تی‌کا‌کا که با شماره ۵ مشخص شد، بود. تاریخ‌های کاشت الزاماً نشان‌دهنده‌ی تاریخ‌های کاشت متداول نیستند، بلکه به‌منظور ایجاد رژیم‌های مختلف دمایی و فتوپریودی انتخاب شدند (Soltani et al., 2006).

با توجه به اینکه آزمایش‌ها در زمان‌های متفاوت اجرا و برای هر تاریخ کاشت زمین انتخابی در نظر گرفته شد؛ طرح آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی اجرا گردید. بعد از آماده‌سازی زمین، کاشت به‌صورت دستی در کرت‌هایی به ابعاد ۳×۳ متر و بر اساس تاریخ کاشت‌های جدول (۱) انجام شد. کرت‌ها با پشته‌هایی به‌عرض یک متر از هم جدا شدند. داخل هر کرت شش ردیف کاشت به‌فاصله نیم متر از هم در نظر گرفته شد. بعد از سبزشدن، تراکم بوته به ۶۴ بوته در مترمربع رسید. آبیاری کرت‌ها به‌صورت غرقابی انجام گردید که در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد هر هفت روز یک‌بار و در سایر ماه‌ها هر ۱۲ روز یک‌بار کرت‌ها آبیاری شدند. کودهی تیمارها شامل مصرف کود اوره به‌صورت سرک و به‌مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، در زمان تشکیل گل‌آذین برای تمام تیمارها اعمال شد. مدیریت آفات برحسب نیاز، عمدتاً در ماه‌های اردیبهشت و خرداد سم‌پاشی بر علیه آفت کرم برگ‌خوار و سنک با سم کلروپریفوس انجام شد. نمونه‌گیری و یادداشت‌برداری‌ها به‌طور مرتب، هر سه روز یک‌بار و متناسب با پیشرفت مراحل فنولوژیک هر لاین انجام شد. عمل نمونه‌گیری مراحل فنولوژیک، مشاهده بوته‌های دو ردیف از وسط هر کرت در طول دو متر بود. ملاک عمل یادداشت‌برداری هر مرحله از نمو (سبزشدن، گل‌دهی و تغییر رنگ بوته‌ها)، ۵۰ درصد بوته‌های مورد بررسی بود. فاصله زمانی از کاشت تا هر مرحله نموی شامل سبزشدن (مشاهده دو برگ حقیقی در سطح خاک)، گرده‌افشانی (ظهور گرده‌های زردرنگ روی سطح گل‌آذین) و رسیدگی‌دانه (تغییر رنگ گل‌آذین‌ها و برگ‌ها) ثبت شد.

مدل DSSAT:

سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری

از آنجا که اندام‌های زایشی در مدل CROPGRO-Soy-bean به عنوان غلاف نامیده می‌شوند، این اصطلاح پس از آن به‌عنوان جایگزینی برای گل‌آذین‌های کینوا استفاده شد. در ادامه با استفاده از ابزار XBuild در نرم‌افزار DSSAT 4.7 اطلاعات محیطی و مدیریتی

برای واسنجی و ارزیابی کارایی مدل از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات یا درصد nRMSE (CV)، شاخص توافق ویلموت (d)، کارایی مدل (ME)، میانگین انحراف از مدل (MB)، ضریب تبیین (R^2)، آزمون خط ۱:۱ روز تا سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک استفاده شد.

RMSE جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده استفاده شده است که هرچه RMSE به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده‌ی آن است که شبیه‌سازی بهتر انجام شده است. چنانچه مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد (Nassiri et al., 2019). هر چه مقدار d به دست آمده توسط مدل به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر بوده و توانسته است میزان پیش‌بینی صفت را با اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده شده انجام دهد (Willmott, 1982). بهترین حالت MB صفر است و هر چه از صفر کمتر باشد یعنی مدل کمتر از واقعیت و هر چه از صفر بزرگ‌تر باشد یعنی مدل بیشتر از واقعیت تخمین می‌زند. شاخص کارایی مدل ME بین صفر و یک خوب است و بهترین حالت عدد یک و بدترین حالت منفی می‌باشد.

ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی: ضرایب a و b به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و مقدار شیب خط رگرسیون از خط ۱:۱ می‌باشند. اگر نقاط پیش‌بینی‌شده روی خط ۱:۱ قرار گیرند، نشان‌دهنده‌ی ایده‌آل بودن مدل است. خط ۱:۱ دارای عرض از مبدأ صفر ($a=0$) و شیب ۴۵ درجه ($b=1$) است (Nassiri et al., 2019).

نتایج و بحث

واسنجی مدل CROPGRO برای پنج لاین و یک رقم کینوا با استفاده از داده‌های شهر یزد انجام شد. واسنجی با مقایسه پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری‌شده در مزرعه و داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل ضرایب ژنتیکی لاین‌ها و رقم کینوا به صورت

شامل تاریخ کاشت، فواصل کاشت، عمق کاشت، تراکم بوته، معرفی لاین‌های کینوا، شیوه آبیاری، زمان و مقدار آبیاری، شیوه مصرف کود و مقدار آن تعریف شد. همچنین با ابزار SBuild خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک، رنگ خاک، درصد مواد آلی، نیتروژن، فسفر و پتاس، PH خاک و هدایت الکتریکی خاک معرفی و فایل داده خاک ساخته شد. فایل داده‌های هواشناسی هر دو منطقه آزمایش شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه (درجه سانتی‌گراد)، مقدار بارندگی روزانه (میلی‌متر) و تشعشع خورشیدی روزانه نیز با ابزار WeatherMan ساخته و به DSSAT 4.7 معرفی گردید.

با استفاده از ابزار ATCreate داده‌های آزمایشی ثبت‌شده شامل داده‌های مربوط به طول دوره آزمایش (صفات فنولوژیکی، شاخص سطح برگ و ارتفاع بوته) و داده‌های مربوط به برداشت نهایی (عملکرد دانه و وزن خشک بوته) به DSSAT 4.7 معرفی و فایل‌های A و T ساخته شد. مدل با دریافت ورودی‌ها، محاسبات را از زمان کاشت تا رسیدگی انجام می‌دهد و مراحل فنولوژی، تجمع و تسهیم ماده خشک، شاخص سطح برگ، رشد ریشه، ساقه و همچنین میزان رطوبت و نیتروژن خاک، میزان مصرف آب و نیتروژن و تأثیر تنش‌های آب و نیتروژن بر رشد و نمو گیاه را شبیه‌سازی می‌نماید.

با اجرای تاریخ‌های مختلف کاشت، طیف گسترده‌ای از شرایط محیطی در مراحل مختلف نمو، ایجاد شده و امکان تخمین ضرایب ژنتیکی و حساسیت‌های دمایی را برای مدل‌سازی رشد محصولات فراهم می‌کند. بنابراین، واسنجی مدل DSSAT 4.7 با داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای انجام شده در سال ۱۳۹۸، با ۵ لاین و یک رقم انتخاب شده در ۳ طبقه (زودرس، متوسط‌رس و دیررس) و ۱۰ تاریخ کاشت (آزمایش شهر یزد) محقق شد. ارزیابی مدل برای فنولوژی، عملکرد نهایی دانه و کل زیست توده در رسیدگی فیزیولوژیک با یک مجموعه داده مستقل حاصل از انجام آزمایش تاریخ‌های کاشت فوق در همان سال در روستای ارنان یزد (آزمایش ۲) انجام شد.

واسنجی و صحت سنجی مدل:

لاین‌ها کمی متفاوت ولی نزدیک به هم بود؛ اما فاصله زمانی بین ظهور اولین دانه (R5) و رسیدگی فیزیولوژیک (R7) در لاین‌های مختلف، تفاوت زیاد داشت به طوری که در لاین دیررس ۴، ۳۵ روز، در لاین‌های متوسط‌تر ۱، ۲ و ۳، ۲۷ روز و رقم زودرس تی‌تی‌کاکا، ۲۵ روز برآورد شد. این پارامتر در لاین ۶، ۳۷ روز برآورد شد (جدول ۲).

دستی و با سعی و خطا استخراج شد (جدول ۲). پارامتر فتوپریود بحرانی (CSDL) در رقم زودرس ۱۳/۸ ساعت، در لاین‌های متوسط‌تر ۱۳/۷ ساعت و لاین دیررس ۱۲/۵ ساعت برآورد شد. حساسیت لاین‌ها به فتوپریود (PPSEN) از ۰/۲۲ تا ۰/۲۵ متفاوت بود. مقادیر پارامترهای زمان بین جوانه‌زنی و ظهور گل (R1)، زمان بین ظهور گل و تشکیل گل‌آذین (R3) و زمان بین تشکیل گل‌آذین و اولین دانه (R5) در تمام

جدول ۲. ضرایب به دست آمده از واسنجی مدل برای لاین‌ها و رقم کینوا با استفاده از مدل CROPGRO

Table 2. Coefficients obtained from model calibration for quinoa lines and varieties using the CROPGRO model

پارامترها parameters	لاین ۱ Line 1	لاین ۲ Line 2	لاین ۳ Line 3	لاین ۴ Line 4	رقم تی‌تی‌کاکا Titicaca cultivar	لاین ۶ Line 6
CSDL	13.7	13.7	13.7	12.5	13.85	13.65
PPSEN	0.23	0.23	0.23	0.25	0.22	0.23
EM- FL (R1)	23.5	23.7	23.8	23	19.5	21
FL- SH (R3)	2.9	3	2.9	3.2	2.9	3
FL- SD (R5)	10	9.5	10	11	10.4	12
SD- PM (R7)	26.5	27	27	35	25	37

دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین ۶، ۷۱ درصد و در لاین ۱، ۸۷ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده شده تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی کینوا قابل توضیح است (جدول ۳). بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.95$) در لاین ۱ و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.91$) در لاین ۶ و رقم تی‌تی‌کاکا محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا غنچه‌دهی در تمامی لاین‌های کینوا است (جدول ۳). برای تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۳/۵ تا ۶/۴ روز، ضریب تغییرات یا درصد (CV) RMSE در دامنه ۷/۳ تا ۱۱/۳ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه ۰/۷۴ تا ۰/۹۶، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۸۳ تا ۱/۵ و ضریب تبیین (R^2) در دامنه ۰/۴۷ تا ۰/۸۵ قرار گرفت (جدول ۳). بنابراین مرحله گل‌دهی توسط مدل بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف

مراحل فنولوژی بر حسب روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک برای پنج لاین و یک رقم کینوا در شرایط نرمال آزمایش شهر یزد با مقادیر شبیه‌سازی شده مقایسه شد (هر نقطه میانگین سه تکرار مشاهده‌های مزرعه می‌باشد). برای تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه ۱/۸ تا ۴ روز، ضریب تغییرات یا درصد (RMSE)، در دامنه ۵/۳ تا ۱۰/۷ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه ۰/۹۱ تا ۰/۹۵، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه ۰/۵ تا ۱/۷۸ و ضریب تبیین (R^2) در دامنه ۰/۷۱ تا ۰/۸۷ قرار گرفت (جدول ۳)؛ بنابراین مرحله غنچه‌دهی بسیار خوب تخمین زده شده است. نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط ۱:۱ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط ۱:۱ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). در بررسی تعداد روز از کاشت تا غنچه‌دهی بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین ۱ ($R^2=0.87$) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۶ ($R^2=0.71$) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مرحله نمودی

بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.96$) در لاین‌های ۱، ۲ و ۶ و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.90$) در لاین ۴ محاسبه شد که نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در تمامی لاین‌های کینوا است. حداکثر اختلاف بین میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک با میانگین داده‌های مشاهده شده آن‌ها در لاین‌های مختلف کینوا ۲ روز بود که نشان از شبیه‌سازی خوب مدل CROP-GRO برای این گیاه دارد (جدول ۳). اگر چه مطالعات واسنجی مدل برای ارقام هر منطقه خاص است و به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند، اما مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بین تعداد روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در این تحقیق قابل مقایسه با یافته‌های دیگر محققان است (Präger et al., 2019).

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی مدل تهیه شده، داده‌های روز تا غنچه‌دهی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که این منطقه از نظر دمایی متفاوت از یزد است و مراحل نمو دارای دوره‌ی متفاوتی است. در ارزیابی ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) بین $10/3$ تا $12/8$ درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین $4/3$ تا $5/4$ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین $0/83$ تا $0/91$ ، میانگین انحراف از مدل (MB) بین $2/2$ تا $2/4$ و ضریب تبیین (R^2) بین $0/73$ تا $0/91$ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا غنچه‌دهی با مدل CROPGRO کالیبره شده برای لاین‌های کینوا داشت و مقادیر روز تا غنچه‌دهی شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (جدول ۴). بررسی شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط $1:1$ در مورد روز تا غنچه‌دهی لاین‌های کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط $1:1$ وجود نداشت (شکل ۳). بنابراین مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا غنچه‌دهی لاین‌های کینوا برخوردار است.

اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). در بررسی تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های ۶ ($R^2=0.85$) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۴ ($R^2=0.47$) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نمو دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین ۶، ۸۵ درصد و در لاین ۴، ۴۷ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده شده تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی کینوا قابل توضیح است (جدول ۳). بالاترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.96$) در لاین ۶ و کمترین مقدار شاخص توافق ویلموت ($d=0.74$) در لاین ۴ محاسبه شد که نشان از شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا گل‌دهی در تمامی لاین‌های کینوا است (جدول ۳).

برای تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بر اساس این نتایج مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در دامنه $2/8$ تا $5/1$ روز، ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) در دامنه $3/1$ تا $5/1$ درصد، شاخص توافق ویلموت (d) در دامنه $0/90$ تا $0/96$ ، میانگین انحراف از مدل (MB) در دامنه $0/33$ تا $2/22$ و ضریب تبیین (R^2) در دامنه $0/72$ تا $0/97$ قرار گرفت. بنابراین مرحله رسیدگی فیزیولوژیک توسط مدل بسیار خوب تخمین زده شده است (جدول ۳). نتایج آزمون t مربوط به مقایسه خط رگرسیون برازش داده شده با خط $1:1$ نیز نشان داد که شیب و عرض از مبدأ خط رگرسیون برازشی با خط $1:1$ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱). در بررسی تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک بزرگترین ضریب تبیین معادله رگرسیون در لاین‌های ۶ ($R^2=0.97$) و کوچکترین ضریب تبیین در لاین ۴ ($R^2=0.72$) بدست آمد. این امر نشان از میزان پراکندگی نقاط در شبیه‌سازی این مراحل نمو دارد و بدین معنا است که با معادله رگرسیون ساده خطی در لاین ۶، ۹۷ درصد و در لاین ۴، ۷۲ درصد از تغییرات در مقادیر شبیه‌سازی شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک، بوسیله تغییرات در مقادیر مشاهده شده تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا قابل توضیح است (جدول ۳).

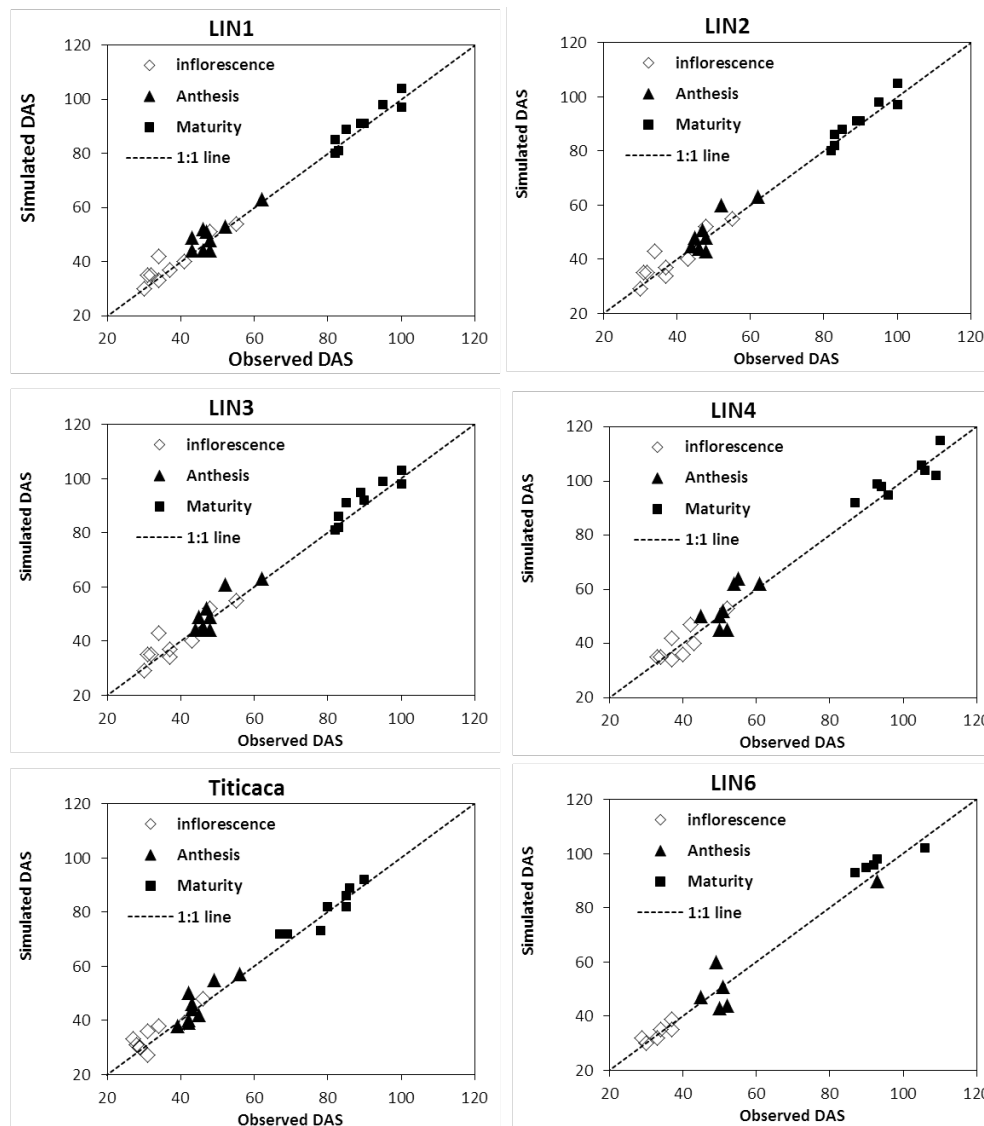
جدول ۳. مقادیر شاخص‌های آماری واسنجی مدل CROPGRO برای شبیه‌سازی روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک کینوا

Table 3. The values of CROPGRO model calibration statistical indices for simulating days to inflorescence, days to anthesis and days to physiological maturity of quinoa

رقم Cultivar	شاخص آماری Statistical index	میانگین مشاهده شده Observed average	میانگین شبیه‌سازی شده Simulated average	RMSE (day)	RMSE (%)	d	MB	R ²
لاین ۱ Line 1	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	38	40	3.4	8.8	0.95	1.67	0.87
	روز تا گلدهی Day until anthesis	48	50	3.5	7.3	0.9	1.44	0.7
	روز تا رسیدگی Days until maturity	90	91	2.8	3.2	0.96	1.11	0.88
لاین ۲ Line 2	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	39	40	4	10.3	0.94	1.44	0.8
	روز تا گلدهی Day until anthesis	49	50	3.7	7.6	0.9	0.89	0.73
	روز تا رسیدگی Days to maturity	90	91	2.8	3.1	0.96	1.22	0.89
لاین ۳ Line 3	روز تا غنچه‌دهی days until inflorescence	39	40	4	10.3	0.95	1.44	0.8
	روز تا گلدهی Day until anthesis	49	50	4	8.2	0.89	1.44	0.71
	روز تا رسیدگی Days until maturity	90	92	3.6	4	0.93	2.22	0.85
لاین ۴ Line 4	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	40	40	3.4	8.4	0.92	0.5	0.73
	روز تا گلدهی Day until anthesis	52	54	5.6	10.6	0.74	1.5	0.47
	روز تا رسیدگی Days until maturity	100	101	4.4	4.4	0.9	1.38	0.72
رقم تی‌تی‌کاکا Titicaca cultivar	روز تا غنچه‌دهی days until inflorescence	33	33	3.5	10.7	0.91	1.78	0.76
	روز تا گلدهی Day until anthesis	45	46	3.9	8.7	0.88	1.11	0.69
	روز تا رسیدگی days until maturity	80	80	3.5	4.4	0.94	0.33	0.79
لاین ۶ Line 6	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	33	34	1.8	5.3	0.91	0.5	0.71
	روز تا گلدهی Day until anthesis	57	56	6.4	11.3	0.96	- 0.83	0.85
	روز تا رسیدگی Days until maturity	99	101	5.1	5.1	0.96	1.67	0.97

انحراف از مدل (MB) بین ۴/۶- تا ۰ و ضریب تبیین (R²) بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۵ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا گل‌دهی با مدل CROPGRO کالیبره شده برای لاین‌های کینوا داشت و مقادیر روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (جدول ۴). مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا گل‌دهی

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی مدل تهیه شده، داده‌های روز تا گل‌دهی شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب تغییرات یا درصد RMSE (CV) بین ۷/۷ تا ۱۳ درصد، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۴/۶ تا ۶/۴ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۷۱ تا ۰/۹۳، میانگین



شکل ۲. روزهای پس از کاشت مشاهده شده در مقابل روزهای پس از کاشت شبیه‌سازی شده در سه مرحله نمو غنچه‌دهی، گل‌دهی و بلوغ لاین‌های مختلف کینوا به همراه خط ۱:۱ و شاخص‌های آماری در نتایج واسنجی

Fig 2. Observed days after planting versus simulated days after planting in the three stages of inflorescence, anthesis and maturity of different quinoa lines along with 1:1 line and statistical indicators of calibration results

منطقه ۲ (روستای ارنان) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضریب تغییرات یا درصد $RMSE$ (CV) بین ۳/۵ تا ۱۱/۱ درصد، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) بین ۹/۱ تا ۳/۲ روز، شاخص توافق ویلموت (d) بین ۰/۳۳ تا ۰/۸۸، میانگین انحراف از مدل (MB) بین ۲/۲- تا ۹- و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۶۲ تا ۰/۷۹ بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب روز تا رسیدگی فیزیولوژیک با مدل CROPGRO کالیبره شده برای لاین‌های

لاین‌های کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت (شکل ۳). بنابراین مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا گل‌دهی لاین‌های کینوا برخوردار می‌باشد.

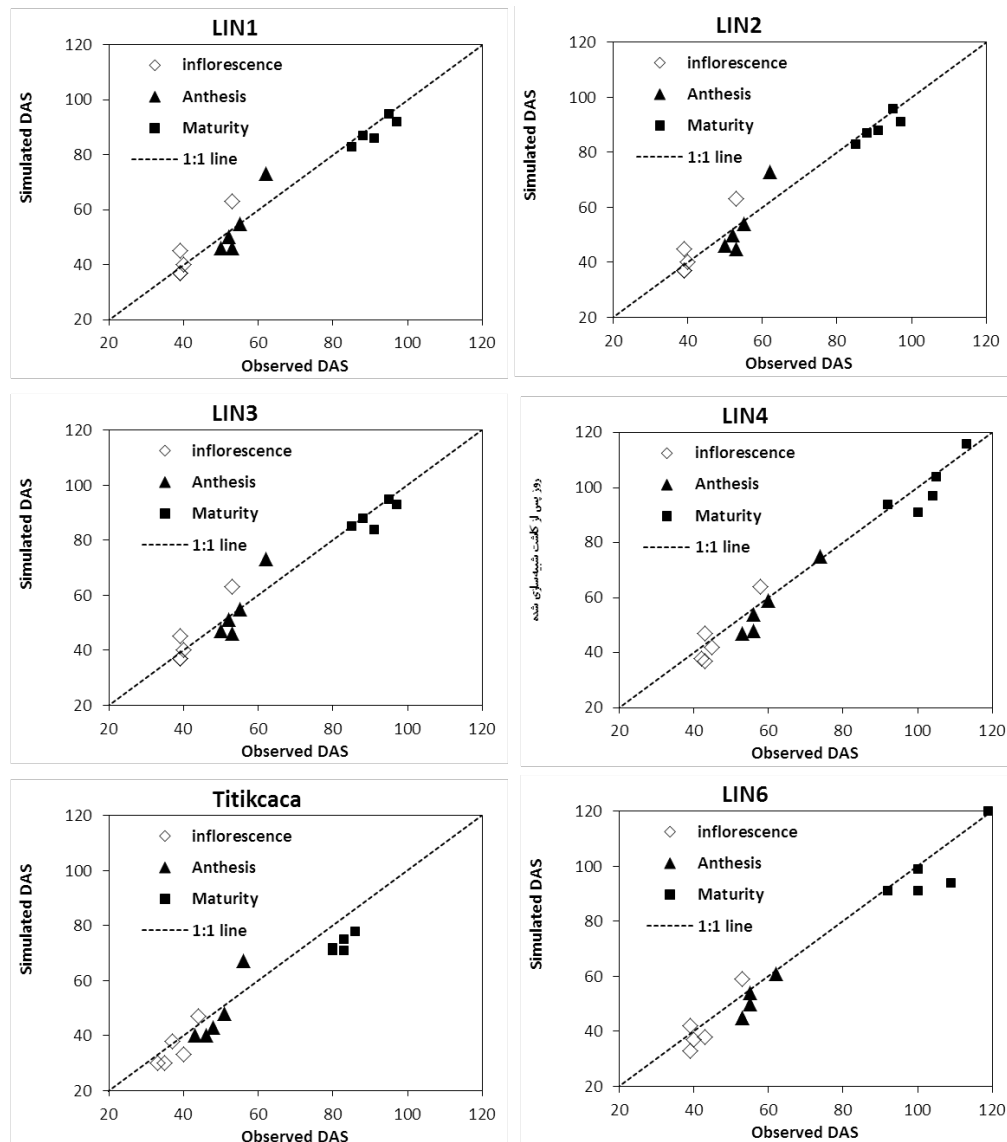
به‌منظور ارزیابی و اطمینان از کارایی مدل تهیه شده، داده‌های روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش میدانی

لاین‌های کینوا برخوردار است. اگر چه مطالعات ارزیابی برای ارقام هر منطقه خاص است و به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند، اما مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بین تعداد روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در این تحقیق قابل مقایسه با یافته‌های دیگر محققان است (Präger et al., 2019).

کینوا داشت و مقادیر روز تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده اعتبار لازم را کسب کردند (جدول ۴). مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط ۱:۱ در مورد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک لاین‌های کینوا نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت (شکل ۳). بنابراین مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی فیزیولوژیک

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های آماری اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی ۶ رقم کینوا
Table 4. Values of statistical indicators of model validation for simulating days until inflorescence, days until anthesis and days until maturity of 6 quinoa cultivars

رقم Cultivar	شاخص آماری Statistical index	میانگین مشاهده شده Observed average	میانگین شبیه‌سازی شده Simulated average	RMSE (Day)	RMSE (%)	d	MB	R ²
لاین ۱ Line 1	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	42	44	5.4	12.8	0.88	2.4	0.91
	روز تا گل‌دهی Day until anthesis	54	54	6.2	11.3	0.81	-0.4	0.94
	روز تا رسیدگی Days until maturity	91	89	3.3	3.6	0.86	-2.6	0.79
لاین ۲ Line 2	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	42	44	5.4	12.8	0.88	2.4	0.91
	روز تا گل‌دهی Day until anthesis	54	54	6.4	11.8	0.8	-0.8	0.92
	روز تا رسیدگی Days until maturity	91	89	3.2	3.5	0.87	-2.2	0.74
لاین ۳ Line 3	روز تا غنچه‌دهی days until inflorescence	42	44	5.4	12.8	0.88	2.4	0.91
	روز تا گل‌دهی Day until anthesis	54	54	6	11	0.81	0	0.92
	روز تا رسیدگی Days until maturity	91	89	3.6	4	0.82	-2.2	0.62
لاین ۴ Line 4	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	46	46	4.8	10.3	0.91	-0.6	0.88
	روز تا گل‌دهی Day until anthesis	60	60	4.6	7.7	0.93	-3.2	0.95
	روز تا رسیدگی Days until maturity	103	100	5.4	5.2	0.88	-2.4	0.72
رقم تی‌تی‌کاکا Titicaca cultivar	روز تا غنچه‌دهی days until inflorescence	38	36	4.3	11.4	0.81	-2.2	0.73
	روز تا گل‌دهی Day until anthesis	49	48	6.3	13	0.83	-1.2	0.87
	روز تا رسیدگی days until maturity	82	73	9.1	11.1	0.83	-9	0.68
لاین ۶ Line 6	روز تا غنچه‌دهی Days until inflorescence	43	42	4.8	11.2	0.89	-1	0.84
	روز تا گل‌دهی Day until anthesis	56	51	5.6	10	0.71	-4.6	0.88
	روز تا رسیدگی Days until maturity	104	99	7.9	7.6	0.86	-5	0.69



شکل ۳. روزهای پس از کاشت مشاهده شده در مقابل روزهای پس از کاشت شبیه‌سازی شده در سه مرحله نمو غنچه‌دهی، گل‌دهی و بلوغ لاین‌های مختلف کینوا به همراه خط ۱:۱ و شاخص‌های آماری در نتایج ارزیابی

Fig 3. The observed days after planting versus the simulation days after planting in the three stages of inflorescence, anthesis and maturity of different quinoa lines along with the 1:1 line and the statistical indicators of the Evaluation results

معنی‌دار نشان داد (شکل‌های ۴ و ۵). مدل CROPGRO، روز تا غنچه‌دهی، روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیک و فاصله زمانی گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک را در تاریخ کاشت‌های مختلف بخوبی شبیه‌سازی کرد و تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد (شکل‌های ۶ و ۷). نتایج نشان داد که روز تا غنچه‌دهی و روز تا گل‌دهی از تاریخ کاشت اول تیرماه تا تاریخ کاشت ۱۰ شهریور در همه لاین‌ها کاهش یافت به نحوی که در تاریخ کاشت اول تیرماه روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳،

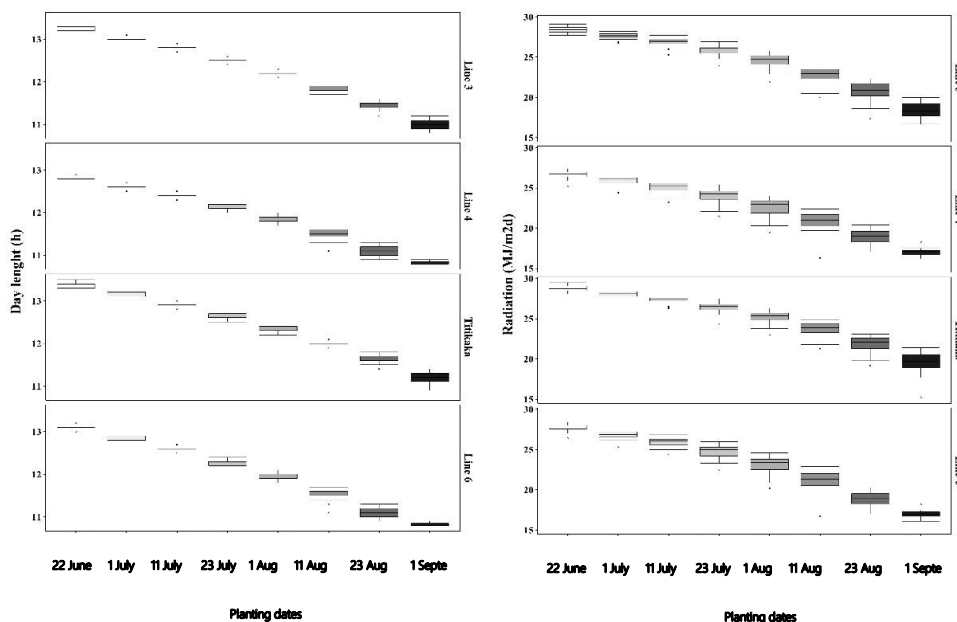
به‌منظور تجزیه و تحلیل مدل CROPGRO آماده شده برای کینوا، این مدل برای تاریخ کاشت‌های تابستان به فاصله ۱۰ روزه و لاین‌های متوسط رس ۳ و ۶، لاین دیررس ۴ و رقم تی‌تی‌کاکا به مدت ۳۰ سال از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ در شرایط پتانسیل برای شهر یزد اجرا شدند. نتایج خروجی مدل برای میانگین طول‌روز، تشعشع، دمای حداقل و حداکثر در طول فصل رشد شبیه‌سازی شده برای تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله بخوبی روند کاهشی را از ابتدا تا انتهای تابستان بدون اختلاف

همچنین عامل افزایش دوره رشد در تاریخ کاشت‌های بعد از اول مرداد نیز کاهش زیاد دما و طول‌روز از دما و طول‌روز بهینه کینوا است که در انتهای نمو موجب طولانی شدن دوره رسیدگی فیزیولوژیک (شکل ۷) گردید.

بررسی تجزیه و تحلیل فصلی ۳۰ ساله مدل برای شهر یزد نشان داد که تاریخ کاشت مطلوب برای لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب اول مرداد، آخر تیر، نیمه مرداد و آخر تیر است زیرا کوتاه‌ترین دوره رشد (شکل ۷) در تاریخ کاشت‌های ذکر شده بود؛ اما به لحاظ اهمیت آب برای بهره‌برداران در تاریخ کاشت‌های فوق با تأخیر در تاریخ کاشت برای لاین‌ها به ترتیب به آخر مرداد، نیمه مرداد، اول شهریور و نیمه شهریور علاوه بر کاهش مصرف آب، طول دوره رشد لاین‌ها به ترتیب ۳/۹، ۶، ۴/۷ و ۱۱/۸ روز بیشتر خواهد شد (شکل ۷)؛ که تأثیر چندانی در مصرف آب نخواهد داشت.

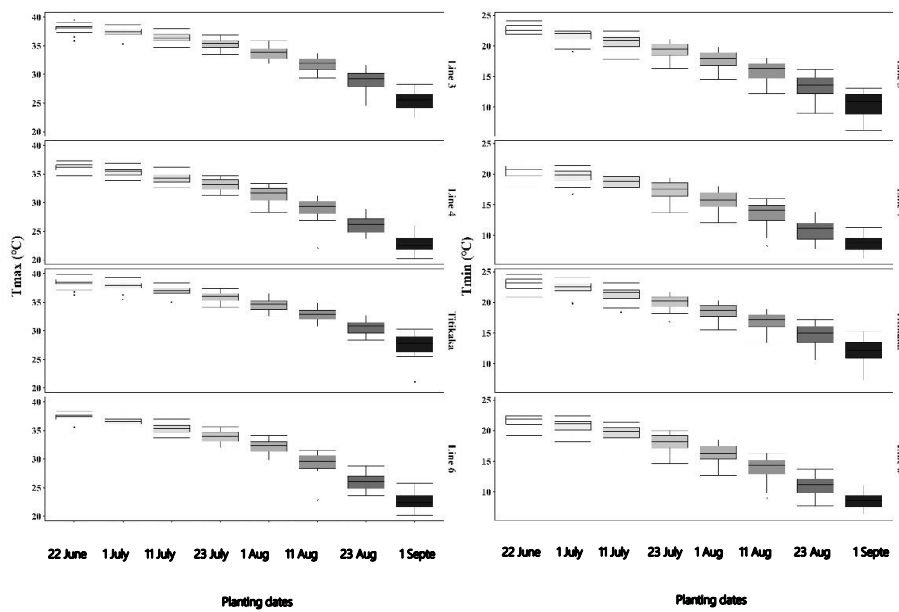
۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۴۱/۲، ۵۵، ۳۸/۲ و ۳۴/۸ روز و تاریخ کاشت ۱۰ شهریور روز تا غنچه‌دهی در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۳۶/۱، ۳۵/۱، ۳۲/۳ و ۳۰/۶ روز بود. این مقدار کاهش روز تا غنچه‌دهی در لاین دیررس ۴ بیشتر از سایر لاین‌ها و حدود ۲۰ روز مشاهده گردید. نتایج روز تا گل‌دهی مشابه نتایج روز تا غنچه‌دهی می‌باشد.

نتایج طول دوره رشد لاین‌ها نشان داد از تاریخ کاشت اول تیر تا اول مرداد، این دوره به ترتیب در لاین‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به تعداد ۳/۹، ۹/۲، ۳/۳ و ۱/۸ روز کوتاه‌تر و از تاریخ کاشت اول مرداد تا آخرین تاریخ کاشت شهریور طول دوره رشد لاین‌ها به ترتیب ۲۷/۹، ۴۴/۷، ۱۴/۳ و ۵۷ روز بلندتر گردید (شکل ۷). احتمال می‌رود علت کاهش طول دوره رشد تا تاریخ کاشت اول مرداد، کاهش کم دما و طول‌روز از دما و طول‌روز بهینه کینوا (Eghbali et al., 2023) باشد که موجب تسریع در غنچه‌دهی و گل‌دهی (شکل ۶) شد؛

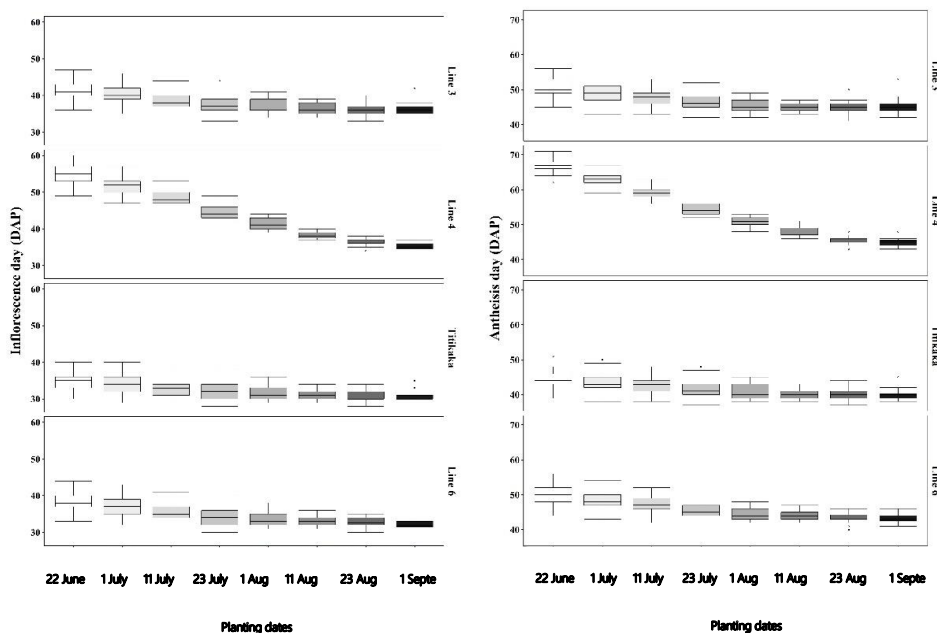


شکل ۴. نتایج خروجی مدل DSSAT برای میانگین طول‌روز (شکل سمت چپ) و تشعشع (شکل سمت راست) در طول فصل رشد شبیه‌سازی شده برای تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹

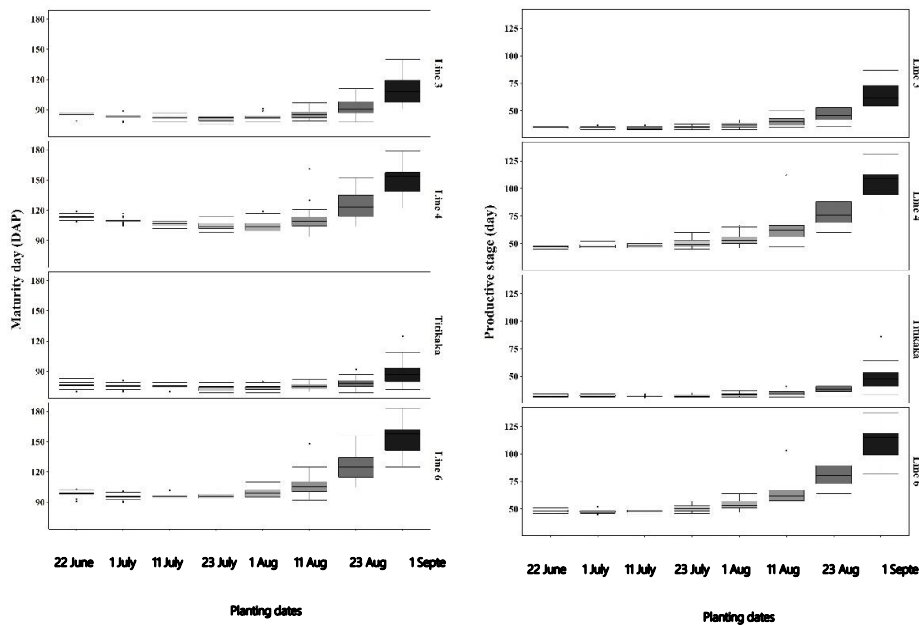
Fig 4. Results for 30 years (1990-2019) for DSSAT model simulated along the seasonal daylength period (left figure) and radiation (right figure) under different planting dates of the quinoa lines.



شکل ۵. نتایج خروجی مدل DSSAT برای میانگین دمای حداکثر (شکل سمت چپ) و دمای حداقل (شکل سمت راست) در طول فصل رشد شبیه‌سازی شده برای تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰-۲۰۱۹
Fig 5. Results for 30 years (1990-2019) for DSSAT model for seasonal maximum temperature (left figure) and minimum temperature (right figure) under different planting dates of the quinoa lines



شکل ۶. نتایج خروجی مدل DSSAT برای پیش‌بینی غنچه‌دهی (شکل سمت چپ) و گل‌دهی (شکل سمت راست) تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰-۲۰۱۹
Fig 6. Result for 30 years DSSAT model's results (1990-2019) for prediction of inflorescence (left figure) and anthesis (right figure) under different planting dates of the quinoa lines from 1990 to 2019.



شکل ۷. نتایج خروجی مدل DSSAT برای پیش‌بینی رسیدگی فیزیولوژیک (شکل سمت چپ) و فاصله گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیک (شکل سمت راست) تاریخ کاشت‌های تابستانه لاین‌های مختلف کینوا در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹

Fig 7. Result for 30 years DSSAT model's results (1990-2019) for prediction of physiological maturity (left figure) and productive stage (right figure) under different planting dates of the quinoa lines from 1990 to 2019.

noa *Chenopodium quinoa* Willd. *Food Rev Int.* 19, 87-97.

- Bunce, J. A. (2018). Thermal acclimation of the temperature dependence of the VCmax of Rubisco in quinoa. *Photosynthetica*, 56, 1171-1176.
- Ceccato, D.V., Daniel Bertero, H. & Batlla, H. (2011). Environmental control of dormancy in quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds: two potential genetic resources for pre-harvest sprouting tolerance. *Seed Sci. Res.* 21, 133-141.
- Eghbali, Sh., Jahan, M., Salehi, M., & Nassiri, M. M. (2023). Determination of Cardinal Temperatures and Photoperiodic Response of Quinoa *Chenopodium quinoa* L. Lines using Linear and Non-linear Models. *Journal of Agroecology*, 15, 191-208. [In Persian].
- Hinojosa, L., González, J., Barrios-Masias, F., Fuentes, F., & Murphy, K. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*, 7, 106.
- Hinojosa, L., Matanguihan, J. B., & Murphy, K. M. (2019). Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa *Chenopodium quinoa* Willd. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205, 33-45.

نتیجه‌گیری

واسنجی و ارزیابی مدل CROPGRO برای کینوا در نرم‌افزار DSSAT 4.7 نشان‌دهنده‌ی شبیه‌سازی خوب داده‌های روز تا غنچه‌دهی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد. با کمک این مدل می‌توان واکنش فنولوژی ارقام کینوا به تاریخ کاشت در مناطق خشک را بخوبی پیش‌بینی کرد و از آن برای تعیین تاریخ کاشت مناسب کینوا کمک گرفت. این مدل کالیبره‌شده هم‌اکنون می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات مختلف مدیریت زراعی و تصمیم‌گیری در نظام‌های کشت کینوا در شرایط اقلیمی جاری و آینده و همچنین جهت بررسی اثرات دما، CO₂، آب، مواد مغذی و شیوه‌های مدیریت زراعی در طیف وسیعی از محیط‌های رشد کینوا مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Bazile, D., Bertero, H. D., & Nieto, C. (2014). Estado del arte de la quinua en el mundo, FAO (Santiago de Chile) y CIRAD (Montpellier, Francia).
- Bertero, H.D. (2003). Response of developmental processes to temperature and photoperiod in Qui-

- can Meteorological Society*, 63, 1309-1313.
- Yin, X., Struik, P. C. J., Tang, Ch. Qi., & Liu, T. (2005). Model analysis of flowering phenology in recombinant inbred lines of barley. *Journal of Experimental Botany*, 56, 959-965.
- Zacharias, M., Kumar, S.N., Singh, S.D., Swaroopa, D.N., & Aggarwal, P.K. (2015). Evaluation of a regional climate model for impact assessment of climate change on crop productivity in the tropics. *Current Science*, 108, 1119-1126.
- Hirich, A., Choukr –Allah, R., & Jacobsen, S.E. (2014). Quinoa in Morocco -Effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 23, 1-7.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., & Tsuji, G.Y. (2004). DSSAT 4., Overview, vol. 1. ICASA, University of Hawaii, Honolulu, USA.
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., L.P., M., & Jones, J.W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>).
- Matthews, R.B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A.C., & Hallett, P.D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: the role of crop modelling. *Global Food Security* 2, 24-28.
- Murphy, K., & Matanguihan, J. (2015). quinoa improvement and sustainable production (I. Jhon Wiley and Sons, Ed.). New Jersey.
- Nassiri, M. M., Koocheki, A. R., Fallahpour, F., & Amiri, M. B. (2019). Optimization of Nitrogen Fertilizer and Irrigation in Wheat *Triticum aestivum* L. Cultivation by Central Composite Design. *Journal of Agroecology*, 11, 515-530. [In Persian].
- Präger, A., Boote, K. J., Munz, S., & Hönninger, S. G. (2019). Simulating growth and development processes of Quinoa *Chenopodium quinoa* Willd.: adaptation and evaluation of the CSM-CROP-GRO model. *Agronomy*, 9, 832.
- Salehi, M., & Dehghani, F. (2017). Quinoa, suitable semi cereal for salt water resources. *Report of Minisrty of Agricultural Jihad*. [In Persian].
- Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103, 198-207.
- Soltani, A., Robertson, M.J., Mohammad-Nejad, Y., & Rahemi-Karizaki, A. (2006). Modeling chick-pea growth and development: leaf production and senescence. *Field Crops Research*. 99, 14-23.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the Ameri-*

Journal of Drought and Climate change Research

JDCR

June, 2024, Vol. 2, No.5



- Evaluating the quality of Shiraz wastewater treatment plant effluent for agricultural uses in drought conditions utilizing IRWQI, NSFQI, and OWQI indicators** 1
Hanie Ghaedi, Mehdi Bahrami
- Preservation and Restoration of Hamoun Wetland: a Joint Solution for Iran and Afghanistan in the Field of Facing the Climate Change Phenomenon** 15
Mohammadreza Farzaneh, Faezeh Banimostafaarab, Sahar Hussein Hamarashid
- Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran using Remote Sensing** 39
Mohadese Sadat Fakhari, Bijan Nazari
- Determining the Water Requirement of Tehran Pine and Chinaberry at Various Vegetative Ages under Drought Stress Conditions** 59
Mohammad Asgari, Vahid Etemad, Khaled Ahmadaali, Ehsan Abdi, Salman Zare, Mohsen JavanmiriPour
- Prioritization of Factors Affecting Drought Using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method (Case Study: Torbat Heydarieh City)** 77
Amir Reza Rezaeei, Ali Reza Roshani
- Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's Self-Adjustment Index** 93
Seyyed Mahmoud Hosseini Seddigh, Masoud Jalali
- Simulation of the Growth of Quinoa with Using DSSAT 4.7 Model in Field Conditions** 107
Shahab Eghbali Shahabad, Mehdi Nassiri-Mahallati, Mohsen Jahan, Mohammad Hassan Fallah