

## Standardized soil moisture agricultural drought index modification based on probability distributions for use in different climates of Iran

Pardis Nikdad<sup>1</sup>, Mehdi Mohammadi Ghalehi<sup>\*2</sup>, Mahnoosh Moghaddasi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [pardiiiis78nk@gmail.com](mailto:pardiiiis78nk@gmail.com)
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [m-mohammadiighalehi@araku.ac.ir](mailto:m-mohammadiighalehi@araku.ac.ir)
3. Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [m-moghaddasi@araku.ac.ir](mailto:m-moghaddasi@araku.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 10.23.2022  
Revised: 12.08.2022  
Accepted: 12.20.2022

### Keywords:

Agricultural drought,  
Climates of Iran,  
Drought's characteristics,  
ERA5 database,  
Soil moisture

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** According to drought type including meteorological, agricultural and hydrological, drought can start with a decrease in variables such as precipitation, soil moisture and runoff compared to the average values. Agricultural drought, which indicates a lack of soil moisture, has important effect such as a decrease in crop yield. One of the most widely used drought monitoring methods is the use of standardized indices. The aim of this study is to modify the standardized soil moisture index (SSI) by selecting the appropriate distribution fitted on soil moisture variable over various climate of Iran.

**Materials and Methods:** In this regard, daily measured data in 40 synoptic stations and monthly soil moisture data in the first (0-7 cm) and second (7-28 cm) layers from the ERA5 database during 1979-2020 have been used. In the second step, after collecting the required data, in order to evaluate the accuracy of the ERA5 database, the measured variables including precipitation, average temperature and potential evapotranspiration using the coefficient of determination ( $R^2$ ), mean bias error (MBE) and scatter index (SI) were compared with the ERA5 database. In the third step of the research, the best fitted distributions on the soil moisture variables of the first and second layer among 49 different distributions in EasyFit 5.5 software were identified by performing the Kolmogorov-Smirnov test at a significance level of 1 and 5 percent. Then, 12 SSI indices have been calculated for 40 studied stations in time scales of 1, 3, and 6 months. In the final step, the characteristics of drought including the number of drought events, frequency, duration and intensity of drought were calculated for all indices and compared with each other in different climates.

**Results:** Based on the SI, the highest accuracy of ERA5 data is related to temperature, potential evapotranspiration and precipitation, respectively. The results of fitting distributions show the significant fitting of gamma distribution as the superior distribution in only 11 and 5% of the first and second layer soil moisture in different stations, respectively. The three superior distributions fitted on the soil moisture of the first layer are Lognormal, Beta, and Logistic distributions, and for the soil moisture in second layer, Logistic, Beta, and Normal distributions, respectively. The minimum and maximum frequency of drought occurred in Abadeh, Anar, Minab and Kerman stations equal to 7, 3, 4 and 2% and in Iranshahr, Bam, Zabol and Iranshahr stations equal to 18.4, 17.8 and 21.0 and 25.4 percent,

---

respectively. The minimum and maximum duration of agricultural drought occurred in Sanandaj and Anar stations, equal to 18 and 64 months, respectively. The intensity of droughts from the index based on the gamma distribution to the index based on the superior distribution decreases from 1.53 to 1.44 in the first soil layer (severe to moderate drought) and from 1.91 to 1.65 in the second soil layer.

**Conclusion:** The sensitivity of the characteristics of agricultural drought based on the type of distribution used in calculating the index shows more changes in drier climates and in the soil moisture of the second layer. So that in some cases it changes according to the type of distribution used in calculating the drought class index. In general, the results of the present research indicate the necessity of examining and selecting the superior distribution instead of the gamma distribution in the calculation of the standardized agricultural drought index.

---

Cite this article: Nikdad, Pardis, Mohammadi Ghalehi, Mehdi, Moghaddasi, Mahnoosh. 2022. Standardized soil moisture agricultural drought index modification based on probability distributions for use in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29 (3), 45-65.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20715.3586

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## اصلاح شاخص خشک‌سالی کشاورزی رطوبت خاک استاندارد شده بر اساس توزیع‌های احتمالاتی به منظور استفاده در اقلیم‌های مختلف ایران

پردیس نیک‌داد<sup>۱</sup>، مهدی محمدی قلعه‌نی<sup>۲\*</sup>، مه‌نوش مقدسی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [pardiiis78nk@gmail.com](mailto:pardiiis78nk@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [m-mohammadighaleni@araku.ac.ir](mailto:m-mohammadighaleni@araku.ac.ir)

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [m-moghaddasi@araku.ac.ir](mailto:m-moghaddasi@araku.ac.ir)

| اطلاعات مقاله   | چکیده   |
|---|---|
| <p>نوع مقاله:</p> <p>مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۰۱/۰۸/۰۱</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۷/۰۹/۰۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۲۹/۰۹/۰۱</p> | <p><b>سابقه و هدف:</b> بر اساس نوع خشک‌سالی شامل هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی، خشک‌سالی می‌تواند با کمبود در یکی از متغیرهای بارش، رطوبت خاک و رواناب نسبت به میانگین بلندمدت آغاز شود. خشک‌سالی کشاورزی بیانگر کاهش رطوبت خاک و دارای اثرات مهمی از جمله کاهش عملکرد محصولات کشاورزی است. یکی از پرکاربردترین روش‌های پایش خشک‌سالی استفاده از شاخص‌های استاندارد شده است. هدف از پژوهش حاضر اصلاح شاخص خشک‌سالی کشاورزی رطوبت خاک استاندارد شده (SSI) با انتخاب توزیع مناسب برازش یافته بر متغیر رطوبت خاک در اقلیم‌های مختلف ایران می‌باشد.</p>   |
| <p>واژه‌های کلیدی:</p> <p>اقلیم‌های ایران، پایگاه داده ERA5، خشک‌سالی کشاورزی، رطوبت خاک، مشخصات خشک‌سالی</p>                             | <p><b>مواد و روش‌ها:</b> بدین منظور از داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه در ۴۰ ایستگاه سینوپتیک و داده‌های رطوبت خاک ماهانه در دو لایه اول (۷-۰ سانتی‌متر) و دوم (۲۸-۷ سانتی‌متر) از پایگاه ERA5 طی سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۷۹ استفاده شده است. پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز پژوهش، دقت داده‌های پایگاه ERA5 در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده سه متغیر بارش، دمای میانگین و تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از معیارهای ضریب تبیین (<math>R^2</math>)، میانگین خطای اریبی (MBE) و شاخص پراکندگی (SI) مقایسه شد. مناسب‌ترین توزیع‌های برازش یافته روی متغیرهای رطوبت خاک لایه اول و دوم از بین ۴۹ توزیع مختلف در نرم‌افزار EasyFit 5.5 با انجام آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی‌داری یک و پنج درصد مشخص شدند. در ادامه برای ۴۰ ایستگاه مورد مطالعه، ۱۲ شاخص SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه محاسبه شده است. در نهایت مشخصات خشک‌سالی شامل تعداد رخدادها، فراوانی، مدت و شدت خشک‌سالی برای تمامی شاخص‌ها محاسبه و در اقلیم‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند.</p> |

**یافته‌ها:** بر اساس معیار شاخص پراکندگی بیش‌ترین دقت داده‌های ERA5 به ترتیب مربوط به متغیرهای دما، تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش است. نتایج برازش توزیع‌ها نشان‌دهنده برازش معنی‌دار توزیع گاما به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع به ترتیب تنها در ۱۱ و ۵ درصد سری‌های زمانی رطوبت خاک لایه اول و دوم در ایستگاه‌های مختلف است. سه مناسب‌ترین توزیع برازش یافته روی رطوبت خاک لایه اول توزیع‌های لوگ‌نرمال، بتا و لجستیک و برای رطوبت خاک لایه دوم به ترتیب توزیع‌های لجستیک، بتا و نرمال می‌باشند. حداقل فراوانی خشک‌سالی در ایستگاه‌های آباد، انار، میناب و کرمان و به ترتیب برابر ۷، ۳، ۴ و ۲ درصد و حداکثر فراوانی در ایستگاه‌های ایرانشهر، بم، زابل و ایرانشهر و به ترتیب برابر ۱۸/۴، ۱۷/۸، ۲۱/۰ و ۲۵/۴ درصد است. کم‌ترین و بیش‌ترین مدت خشک‌سالی کشاورزی به ترتیب در ایستگاه‌های سنندج و انار به ترتیب برابر با ۱۸ و ۶۴ ماه رخ داده است. شدت خشک‌سالی‌ها از شاخص بر مبنای توزیع گاما به شاخص بر مبنای توزیع مناسب در رطوبت لایه اول خاک از ۱/۵۳ به ۱/۴۴ (خشک‌سالی شدید به خشک‌سالی متوسط) و در رطوبت لایه دوم خاک از ۱/۹۱ به ۱/۶۵ کاهش می‌یابد.

**نتیجه‌گیری:** حساسیت مشخصات خشک‌سالی کشاورزی بر مبنای نوع توزیع استفاده‌شده در محاسبه شاخص، در اقلیم‌های خشک‌تر و در رطوبت خاک لایه دوم تغییرات بیش‌تری را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که در برخی موارد با توجه به نوع توزیع استفاده‌شده در محاسبه شاخص طبقه خشک‌سالی تغییر می‌یابد. به‌طورکلی نتایج پژوهش حاضر بیانگر ضرورت بررسی و انتخاب توزیع مناسب به‌جای توزیع گاما در محاسبه شاخص خشک‌سالی استانداردشده کشاورزی است.

**استناد:** نیک‌داد، پردیس، محمدی قلعه‌نی، مهدی، مقدسی، مهنوش (۱۴۰۱). اصلاح شاخص خشک‌سالی کشاورزی رطوبت خاک استانداردشده براساس توزیع‌های احتمالاتی به‌منظور استفاده در اقلیم‌های مختلف ایران. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۹ (۳)، ۴۵-۶۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2023.20715.3586



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

خشک‌سالی هواشناسی از کمبود بارش شروع شده و منجر به کمبود در سایر مؤلفه‌های بیلان آب مانند رطوبت خاک، رواناب سطحی و تغذیه آب‌زیرزمینی می‌شود. خشک‌سالی را می‌توان به دسته‌های مختلفی از جمله خشک‌سالی هواشناسی (کمبود بارش)، کشاورزی (کمبود رطوبت خاک)، هیدرولوژیکی (کمبود رواناب) و اجتماعی-اقتصادی تقسیم‌بندی کرد. یکی از مهم‌ترین مراحل محاسبه جهت استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی تعیین توزیع مناسب برازش یافته به متغیر موردنظر است. انتخاب توزیع احتمالاتی نامناسب در محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی می‌تواند باعث عدم دقت کافی در مشخصات خشک‌سالی مانند تعداد رخدادها، فراوانی، مدت و شدت خشک‌سالی در طبقات مختلف شود. پژوهش‌های متعددی برای اصلاح شاخص‌های خشک‌سالی با توجه به نوع توزیع مناسب برازش یافته روی متغیر موردنظر انجام شده است. مرور منابع مطالعات انجام شده در زمینه اصلاح شاخص‌های خشک‌سالی حکایت از دسته‌بندی پژوهش‌ها در سه دسته شامل اصلاح شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی شامل شاخص بارش استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPI) و شاخص شناسایی خشک‌سالی<sup>۲</sup> (RDI)، شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی مانند شاخص خشک‌سالی جریان<sup>۳</sup> (SDI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) و کاربرد شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی مانند شاخص رطوبت خاک استاندارد شده<sup>۴</sup> (SSI) دارد (۱، ۲، ۳، ۴ و ۵).

ژائو و همکاران (۲۰۲۰) به تجزیه و تحلیل توزیع احتمالاتی مناسب برای شاخص SPI طی سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۶۱ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو توزیع ویبول و گاما نسبت به سایر توزیع‌ها مناسب‌تر

می‌باشند (۶). محمودی و همکاران (۲۰۲۱) شاخص SPI را با استفاده از برازش توزیع‌های احتمالاتی مناسب برای کشور ایران اصلاح کردند. نتایج آن‌ها بیانگر ضرورت جداسازی بارش در ماه‌های مختلف به دلیل متفاوت بودن توزیع‌های برازش یافته داشت (۷). معینی‌فر و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی توزیع مناسب برای شاخص RDI در اقلیم خشک ایران مرکزی پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های ۱۶ ایستگاه سینوپتیک، مناسب‌ترین توزیع آماری را براساس شاخص‌های AIC و BIC از بین ۱۷ توزیع آماری منتخب انتخاب کردند. نتایج ایشان بیانگر مناسب‌تر بودن توزیع ناکاگامی برای محاسبه شاخص RDI بوده و بیانگر اثرات انتخاب توزیع مناسب روی طبقات خشک‌سالی و ترسالی می‌باشد (۸).

ناظری و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی توابع توزیع آماری رایج و روش‌های محاسبه پارامترهای آن‌ها در برآورد احتمال رویدادهای خشک‌سالی هیدرولوژیکی پرداختند. ایشان به منظور برآورد احتمال خشک‌سالی هیدرولوژیکی رودخانه‌های غربی در حوضه دریاچه ارومیه، ۱۲ توزیع آماری رایج مورد آزمون قرار دادند. با استفاده از آزمون نکویی برازش کای دو و ضریب تبیین بین داده‌های مدل شده و مشاهده‌ای، تابع لوگ پیرسون تیپ ۳ به عنوان مناسب‌ترین توزیع انتخاب شد (۹). جمال و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر انتخاب توزیع احتمال مناسب‌تر را روی شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه بررسی کردند. نتایج آن‌ها بیانگر مناسب‌تر بودن توزیع وکیبی نسبت به توزیع گاما بود (۱۰).

صالحی طبس و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل DSSAT<sup>۵</sup>، خشک‌سالی کشاورزی دوره‌های آتی دشت بیرجند را با استفاده از شاخص کمبود رطوبت خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان بیانگر بیش‌تر شدن خشک‌سالی‌ها در دوره آتی نسبت به دوره پایه بوده است (۱۱). کای و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات

5- Decision Support System for Agrometeorology Transfer (DSSAT)

1- Standardized precipitation index (SPI)  
2- Reconnaissance Drought Index (RDI)  
3- streamflow drought index (SDI)  
4- Standardized soil moisture index (SSI)

فراوانی، مدت و شدت بر اساس دو توزیع گاما و توزیع مناسب‌تر می‌باشد. این مراحل در ادامه به طور کامل شرح داده شده است.

به منظور انتخاب ایستگاه‌های سینوپتیک و جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر، کشور ایران با در نظر گرفتن اقلیم‌های مختلف آن در نظر گرفته شد (شکل ۲). اقلیم‌بندی در پژوهش حاضر با استفاده از شاخص خشکی<sup>۱</sup> ( $AI=P/PET$ ) یا نسبت میانگین بارش سالانه (P) به میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (PET) انجام شده است. بر اساس شاخص AI، اقلیم ایران به چهار اقلیم فراهشک ( $P/PET < 0.3$ )، خشک ( $0.3 < P/PET < 0.75$ )، نیمه‌خشک ( $0.75 < P/PET < 1.0$ ) و مرطوب ( $P/PET > 1.0$ ) تقسیم‌بندی می‌شود (۱۴ و ۱۵). از بین ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در سراسر کشور تعداد ۴۰ ایستگاه سینوپتیک (شکل ۲-الف) با در نظر گرفتن نکاتی مانند در دسترس بودن آمار روزانه متغیرهای هواشناسی، پراکنش مکانی مناسب در محدوده کل کشور و انتخاب بر اساس اقلیم‌های مختلف انتخاب شده است. تمامی متغیرهای اندازه‌گیری شده در این ایستگاه‌ها شامل بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و تعداد ساعات آفتابی با مقیاس زمانی روزانه طی سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۸۷ جمع‌آوری شده است. این داده‌ها از سازمان هواشناسی ایران<sup>۲</sup> (IRIMO) دریافت و با استفاده از آن‌ها مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از روش پنمن-مانتیث فائو<sup>۳</sup> ( $PM_{FAO56}$ ) محاسبه شده است. شکل ۲، موقعیت مکانی داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

زمانی- مکانی خشک‌سالی کشاورزی را با استفاده از داده‌های رطوبت خاک پایگاه ERA5 در مغولستان بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان بیانگر فراوانی بیش‌تر خشک‌سالی طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۰ در ۴۰ سال اخیر داشت (۱۲). نوایی و همکاران (۲۰۲۱) خشک‌سالی کشاورزی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه را با استفاده از چند شاخص کشاورزی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر ارتباط قوی‌تر بین شاخص سلامت پوشش گیاهی با شاخص SPI داشت (۱۳).

جمع‌بندی مرور منابع پژوهش حاضر بیانگر وجود خلأ تحقیقاتی در مورد ارزیابی توزیع‌های احتمالاتی مناسب روی شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی است. به طوری که بیش‌تر پژوهش‌ها روی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی انجام شده است. در این راستا هدف اصلی پژوهش حاضر اصلاح شاخص خشک‌سالی کشاورزی SSI با ارزیابی توزیع مناسب‌تر برازش یافته روی رطوبت خاک اقلیم‌های مختلف ایران می‌باشد. نوآوری‌های پژوهش حاضر شامل ارزیابی شاخص SSI در اقلیم‌های مختلف ایران و اصلاح شاخص SSI بر اساس توزیع مناسب‌تر برازش یافته روی رطوبت خاک لایه اول و دوم با استفاده از داده‌های پایگاه ERA5 است.

## مواد و روش‌ها

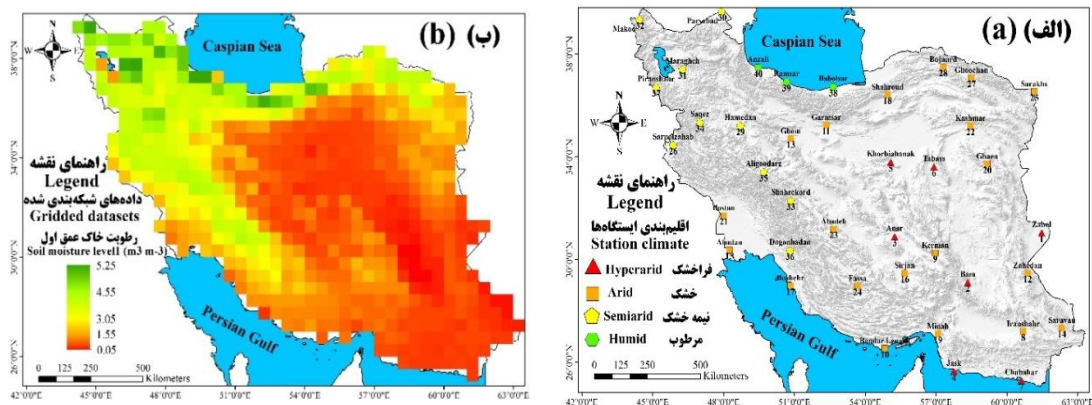
مراحل انجام پژوهش حاضر در قالب روندنما در شکل ۱ ارائه شده است. این مراحل به‌طور کلی دارای ۵ بخش شامل (۱) انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس دسته‌بندی اقلیمی و جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، (۲) ارزیابی دقت داده‌های مورد استفاده، (۳) برازش و انتخاب توزیع‌های احتمالاتی مناسب، (۴) محاسبه شاخص رطوبت استاندارد شده بر اساس توزیع گاما و توزیع مناسب‌تر در سه مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه، (۵) محاسبه و مقایسه مشخصات خشک‌سالی کشاورزی شامل تعداد رخداد‌های خشک‌سالی، درصد

1- Aridity Index (AI)  
2- Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO)  
3- Penman-Monteith method based on United Nations Food and Agriculture Organization in its Irrigation and Drainage Paper No. 56 (PM FAO56)



شکل ۱- روندنمای مراحل انجام پژوهش حاضر.

Figure 1. Flowchart of the present study steps.

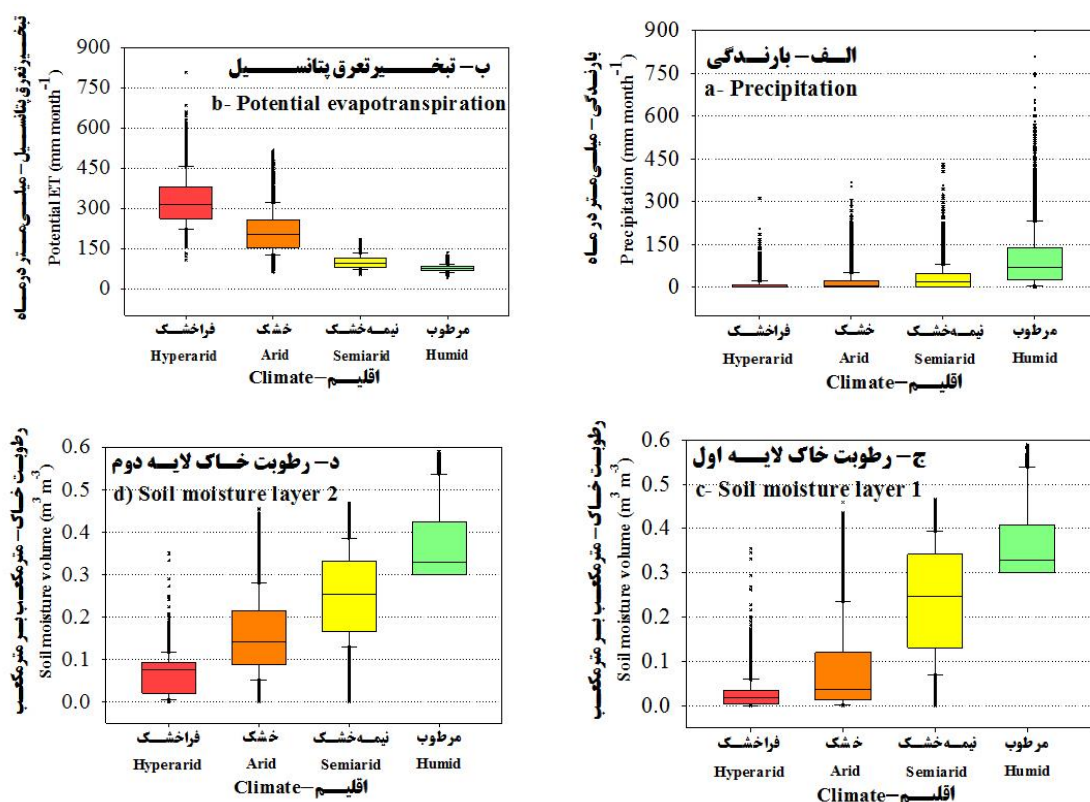


شکل ۲- (الف) موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و (ب) داده‌های شبکه‌بندی شده پایگاه ERA5 در پژوهش حاضر.

Figure 2. Location of synoptic stations (a) and gridded datasets of ERA5 (b) in present study.

پایگاه داده ERA5 در پژوهش هرسباچ و همکاران (۲۰۲۰) ارائه شده است (۱۶). در پژوهش حاضر داده‌های ماهانه بارش، دمای میانگین، تبخیر و تعرق پتانسیل و رطوبت خاک در لایه اول (۷-۰ سانتی‌متر) و لایه دوم (۲۸-۷ سانتی‌متر) از این پایگاه طی دوره ۱۹۷۹-۲۰۲۰ با تفکیک مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه به‌منظور مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شاخص خشک‌سالی کشاورزی استفاده شده است. در شکل ۳، حدود تغییرات داده‌های ERA5 برای چهار متغیر بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و رطوبت خاک در عمق اول و دوم نشان داده شده است.

ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه (شکل ۲-الف) بر اساس نوع اقلیم از فراخشک به مرطوب به‌ترتیب از ۱ (ایستگاه زابل) تا ۴۰ (ایستگاه بندر انزلی) شماره‌گذاری شده‌اند. بر این اساس ۷ ایستگاه در اقلیم فراخشک (ایستگاه‌های ۱-۷)، ۲۱ ایستگاه در اقلیم خشک (ایستگاه‌های ۸-۲۸)، ۹ ایستگاه در اقلیم نیمه‌خشک (ایستگاه‌های ۲۹-۳۷)، و ۳ ایستگاه در اقلیم مرطوب (ایستگاه‌های ۳۸-۴۰) قرار دارند. داده‌های شبکه‌بندی مورد استفاده در پژوهش حاضر از نسخه پنجم داده‌های بازتحلیل شده (ERA5) مرکز پیش‌بینی میان‌مدت اروپا<sup>۱</sup> (ECMWF) دریافت شده است (شکل ۲-ب). شرح جزئیات مربوط به



شکل ۳- حدود تغییرات پارامترهای الف) بارش، ب) تبخیر و تعرق پتانسیل، ج) رطوبت خاک لایه اول و د) رطوبت خاک لایه دوم به تفکیک اقلیم‌های مختلف ایران.

Figure 3. Range of precipitation (a), potential evapotranspiration (b), soil moisture layer 1 (c) and soil moisture layer 2 (d) in various climates of Iran.

1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)



(رطوبت خاک) می‌باشد. در بسیاری از پژوهش‌های خشک‌سالی فرض بر پیروی متغیر از توزیع‌های احتمالاتی مانند توزیع گاما یا نرمال شده و با همین فرض شاخص خشک‌سالی محاسبه می‌شود. اما از آنجایی که در بسیاری از پژوهش‌ها اثر معنی‌دار نوع توزیع برازش داده شده روی مقادیر شاخص خشک‌سالی به اثبات رسیده است، در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار EasyFit 5.5 مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی برازش یافته به رطوبت خاک ماهانه در لایه اول و دوم از بین ۴۹ توزیع احتمالاتی پیوسته مشخص شده است. معنی‌داری برازش توزیع‌های احتمالاتی با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطوح معنی‌داری یک و پنج درصد بررسی شده است (۶).

در انتخاب توزیع مناسب ابتدا برای هر ۱۲ ماه داده رطوبت خاک در دو لایه اول و دوم به تفکیک هر ماه به طور جداگانه، ۴۹ توزیع برازش داده شد. در این مرحله توزیع مناسب هر ماه از بین ۴۹ توزیع برای محاسبه شاخص‌های SSI1 و SSI2 انتخاب شد. در ادامه این مرحله برای تمامی ۴۰ ایستگاه مورد بررسی تکرار و در هر ایستگاه، توزیع مناسب برازش یافته بر اساس آزمون کلموگروف-اسمیرنوف مشخص و برای محاسبه شاخص خشک‌سالی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفت.

برای محاسبه شاخص خشک‌سالی کشاورزی رطوبت خاک استاندارد شده، طی سالیان اخیر شاخص‌های زیادی به منظور پایش خشک‌سالی کشاورزی از جمله شاخص رطوبت خاک استاندارد شده<sup>۵</sup> (SSI)، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده<sup>۶</sup> (NDVI) و شاخص سلامت گیاه<sup>۷</sup> (VHI) معرفی شده است. در پژوهش حاضر از شاخص SSI برای محاسبه مشخصات خشک‌سالی کشاورزی در

به منظور بررسی دقت داده‌های پایگاه ERA5، مقادیر اندازه‌گیری شده سه متغیر بارش، دمای میانگین و تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های سینوپتیک با مقادیر نزدیک‌ترین شبکه در داده‌های شبکه‌بندی شده ERA5 مقایسه شده است. به این منظور از سه معیار ارزیابی شامل ضریب تبیین<sup>۱</sup> ( $R^2$ )، میانگین خطای اریبی<sup>۲</sup> (MBE) و شاخص پراکنش<sup>۳</sup> (SI) یا همان خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده<sup>۴</sup> (NRMSE) استفاده شده است. روابط این معیارها در روابط ۱ تا ۳ ارائه شده است.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{t=1}^N (M_t - \bar{M})(E_t - \bar{E})}{\sqrt{\left[ \sum_{t=1}^N (M_t - \bar{M})^2 \right] \left[ \sum_{t=1}^N (E_t - \bar{E})^2 \right]}} \right]^2 \quad (1)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (E_t - M_t) \quad (2)$$

$$SI \text{ or } NRMSE = \frac{RMSE}{M} \quad (3)$$

در روابط ۱ تا ۳،  $M_t$  و  $E_t$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده متغیرها در زمان  $t$ ،  $\bar{M}$  و  $\bar{E}$  میانگین مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده،  $t$  مقیاس زمانی به ماه و  $N$  تعداد کل ماه‌های مورد بررسی در دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشد. میزان دقت برآورد یک متغیر را با استفاده از شاخص SI می‌توان به ۴ دسته عالی ( $SI < 0/1$ )، خوب ( $0/1 < SI < 0/2$ )، متوسط ( $0/2 < SI < 0/3$ ) و ضعیف ( $SI > 0/3$ ) تقسیم‌بندی کرد (۱۷).

اولین مرحله برای محاسبه انواع شاخص‌های خشک‌سالی استاندارد شده مانند شاخص SPI، تعیین تابع توزیع احتمالاتی برازش یافته به متغیر موردنظر

- 1- Coefficient of determination ( $R^2$ )
- 2- Mean Bias Error (MBE)
- 3- Scatter Index (SI)
- 4- Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE)

- 5- Standardized soil moisture index (SSI)
- 6- Normalized difference vegetation index (NDVI)
- 7- Vegetation health index (VHI)

اقلیم‌های مختلف ایران استفاده شده است. شاخص SSI با استفاده از روابط ۱ قابل محاسبه می‌باشد (۱۸).

$$SSI = \begin{cases} -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & \text{if } 0 < p \leq 0.5 \\ +\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & \text{if } 0.5 < p \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$p(x_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad (5)$$

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}} \\ \sqrt{\ln \frac{1}{(1-p)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه ۴،

$$C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802583,$$

$$C_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788,$$

$$d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

می‌باشد. هم‌چنین در روابط ۵ و ۶،  $n$  تعداد نمونه‌ها،  $i$  رتبه داده رطوبت خاک در سری نزولی داده‌ها و  $p(x_i)$  احتمال تجربی موردنظر را نشان می‌دهد (۱۸). تنها تفاوت در روند محاسبه شاخص SSI با شاخص SPI در جایگزینی مقادیر رطوبت خاک با مقادیر بارش می‌باشد (۱۸). شاخص SSI با استفاده از کد برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب برای رطوبت خاک در دو لایه اول (SSI1) و دوم (SSI2) و برای سه مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه محاسبه شده است (۱۹ و ۲۰).

برای ۴۰ ایستگاه مورد مطالعه (شکل ۱-الف)، ۱۲ شاخص SSI شامل شاخص یک‌ماهه توزیع گاما در لایه اول (SSI1G) و دوم خاک (SSI2G)، شاخص سه‌ماهه توزیع گاما در لایه اول (SSI13G) و دوم

خاک (SSI23G)، شاخص شش‌ماهه توزیع گاما در لایه اول (SSI16G) و دوم خاک (SSI26G)، شاخص یک‌ماهه مناسب‌ترین توزیع<sup>۱</sup> در لایه اول (SSI1S) و دوم خاک (SSI21S)، شاخص سه‌ماهه توزیع مناسب‌تر در لایه اول (SSI13S) و دوم خاک (SSI23S)، شاخص شش‌ماهه توزیع مناسب‌تر در لایه اول (SSI16S) و دوم خاک (SSI26S) با استفاده از داده‌های ماهانه رطوبت خاک طی سال‌های ۱۹۸۷-۲۰۲۰ محاسبه شده است.

برای محاسبه و مقایسه مشخصات خشک‌سالی کشاورزی بر مبنای نوع توزیع برازش یافته، در پژوهش مشخصات خشک‌سالی شامل شدت، مدت و فراوانی برای ۱۲ شاخص بیان شده در مرحله قبل با استفاده از روابط ۴ تا ۶ محاسبه شده است. حد آستانه تشخیص خشک‌سالی کشاورزی (وقوع رخداد خشک‌سالی) مقادیر شاخص کم‌تر از منفی یک در نظر گرفته شده است. شدت خشک‌سالی بر اساس رابطه ۴، از حاصل تقسیم قدرمطلق مجموع مقدار خشک‌سالی‌ها به تعداد رخدادهای خشک‌سالی به‌دست می‌آید. در پژوهش حاضر حد آستانه تشخیص خشک‌سالی، مقادیر شاخص SSI کم‌تر از منفی یک در نظر گرفته شده است.

$$I = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DI_i \right| \quad (7)$$

در رابطه ۷،  $I$  شدت خشک‌سالی،  $DI_i$  مقدار تجمعی مقادیر شاخص خشک‌سالی در رخداد  $i$ ام و  $n$  تعداد رخدادهای خشک‌سالی در طول دوره آماری مورد بررسی می‌باشد (۲۱ و ۲۲). مدت خشک‌سالی نیز براساس رابطه ۸ از حاصل تقسیم مجموع طول مدت رخدادهای خشک‌سالی به تعداد کل رخدادهای خشک‌سالی در یک ایستگاه به‌دست می‌آید.

مشخصات خشک‌سالی برای شاخص‌های بر مبنای دو توزیع گاما و توزیع مناسب‌تر در اقلیم‌های مختلف ایران با یکدیگر مقایسه شده است.

### نتایج و بحث

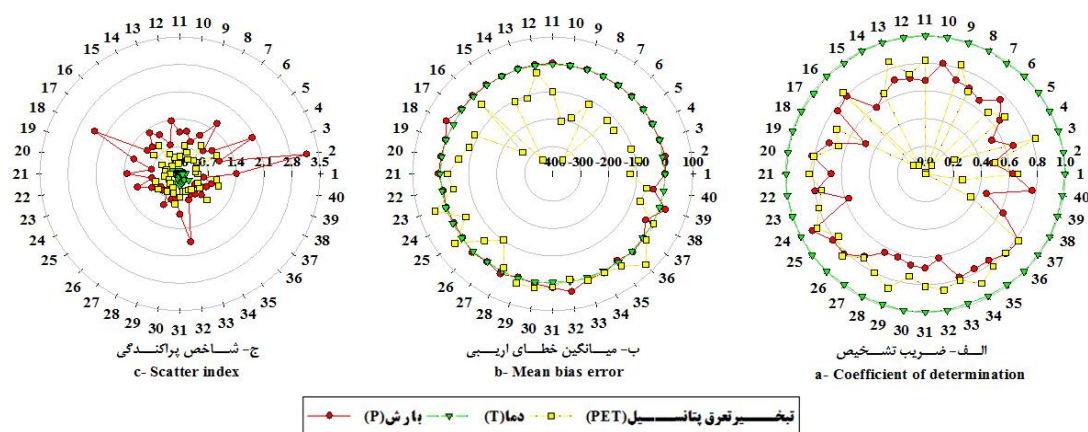
ارزیابی دقت داده‌های پایگاه ERA5 برای متغیرهای بارش، دمای میانگین و تبخیر و تعرق پتانسیل بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های سینوپتیک با استفاده از سه معیار آماری ضریب تبیین، میانگین خطای اریبی و شاخص پراکندگی در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر این معیارها به تفکیک هر ایستگاه بر اساس شماره‌گذاری ایستگاه‌ها (شکل ۲-الف) از شماره یک تا ۴۰ مشخص شده است.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (8)$$

در رابطه ۵،  $D$  مدت خشک‌سالی،  $d_i$  طول مدت خشک‌سالی در رخداد  $i$ ام و  $n$  تعداد کل رخدادها در خشک‌سالی در ایستگاه مورد بررسی می‌باشد (۲۳). فراوانی خشک‌سالی نیز بر اساس رابطه ۹ از حاصل تقسیم تعداد ماه‌های خشک‌سالی به کل تعداد ماه‌های مورد بررسی محاسبه می‌شود.

$$F = \frac{n_m}{N_m} \times 100\% \quad (9)$$

در رابطه ۹،  $F$  فراوانی خشک‌سالی،  $n_m$  تعداد رخدادها در خشک‌سالی و  $N_m$  تعداد کل ماه‌های مورد بررسی می‌باشد (۲۲ و ۲۴). پس از محاسبه،



شکل ۴- ارزیابی دقت داده‌های ERA5 (الف ضریب تبیین، ب) میانگین خطای اریبی و ج) شاخص پراکندگی.

Figure 4. Evaluation of ERA5 datasets based on coefficient of determination (a), mean bias error (b) and scatter index (c).

بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی به ترتیب [۰/۰-۰۱/۸۹] و [۰/۰-۴۶/۹۱] می‌باشد (شکل ۴-الف).

بر اساس معیار میانگین خطای اریبی داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل در بیش از ۷۲ درصد ایستگاه‌ها (۲۹ از ۴۰ ایستگاه)، دارای کم‌برآورد ( $MBE < 0$ ) می‌باشد که در (شکل ۴-ب) مشخص است. این

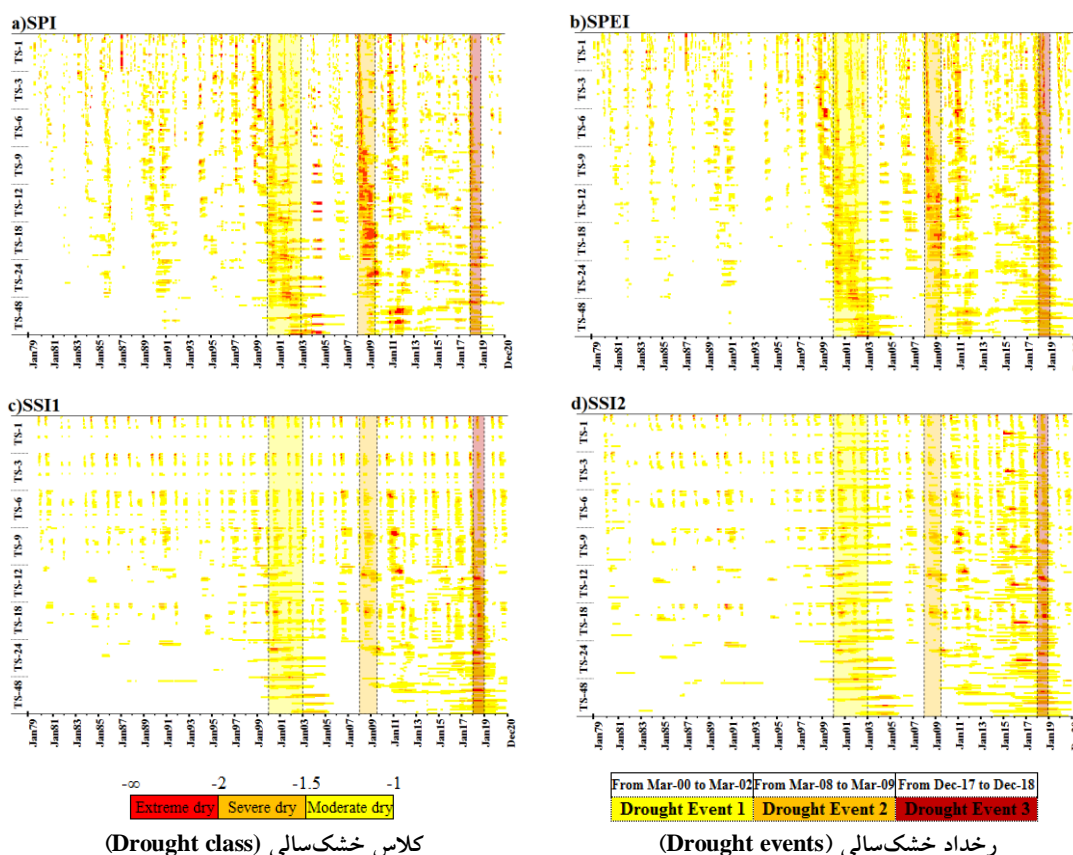
مقادیر ضریب تبیین (شکل ۴-الف) نشان‌دهنده بیش‌ترین همبستگی بین پارامتر دمای میانگین اندازه‌گیری‌شده (ایستگاه‌های سینوپتیک) و بازتحلیل شده (ERA5) است. به طوری که مقادیر ضریب تبیین بین دمای میانگین ماهانه اندازه‌گیری‌شده و بازتحلیل شده در تمامی ۴۰ ایستگاه مورد بررسی بیش‌تر از ۰/۹۸ می‌باشد. محدوده ضریب تبیین برای پارامترهای

( $SI < 0/1$ ) قرار دارد. به‌طور کلی از لحاظ بررسی اقلیمی دقت برآورد بارش در پایگاه ERA5 از اقلیم فراخشک به مرطوب افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین دقت برآورد پارامترهای دما و تبخیر و تعرق پتانسیل به‌ترتیب در اقلیم‌های مرطوب و خشک نسبت به سایر اقلیم‌ها بیش‌تر است (شکل ۴-ج).

با هدف ارزیابی مقادیر شاخص خشک‌سالی کشاورزی در دو لایه اول و دوم خاک ( $SSI1$  و  $SSI2$ )، وقایع خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از دو شاخص  $SPI$  و  $SPEI$  در طول دوره مورد بررسی مشخص و با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۵، مقادیر شاخص‌های  $SPI$ ،  $SPEI$ ،  $SSI1$  و  $SSI2$  را در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۴۸ ماه برای تمامی سلول‌های مورد بررسی با تفکیک مکانی  $0/25 \times 0/25$  درجه نشان می‌دهد.

مقدار برای پارامترهای دما و بارش به ترتیب ۴۷ (۱۹ از ۴۰ ایستگاه) و ۴۰ درصد (۱۶ از ۴۰ ایستگاه) می‌باشد. هم‌چنین نتایج  $MBE$  بیانگر برآورد کم‌تر بارش در ایستگاه‌های اقلیم مرطوب (ایستگاه‌های ۳۸ تا ۴۰) نسبت به ایستگاه‌های اقلیم فراخشک (ایستگاه‌های ۱ تا ۷) دارد. این برآورد در مورد تبخیر و تعرق پتانسیل بالکعس می‌باشد. به عبارت دیگر مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل پایگاه ERA5 در اقلیم‌های فراخشک نسبت به داده‌های واقعی برآورد کم‌تری نسبت به اقلیم‌های مرطوب دارند.

بر اساس معیار شاخص پراکندگی بیش‌ترین دقت داده‌های ERA5 به ترتیب مربوط به پارامترهای دما، تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش است (شکل ۴-ج). بر این اساس دقت داده‌های ERA5 برای پارامترهای دما در ۷۰ درصد (۲۸ از ۴۰ ایستگاه) در دسته دقت عالی



شکل ۵- مقادیر شاخص‌های  $SPI$ ،  $SPEI$ ،  $SSI1$  و  $SSI2$  در ۶۲۱ سلول مورد بررسی طی دوره ۱۹۷۹-۲۰۲۰.

Figure 5. Heat map of drought indices (SPI, SPEI, SSI1 and SSI2) in multi time scales during Jan79-Dec20 in 621 grids.

اصلاح شاخص خشک‌سالی کشاورزی رطوبت خاک ... / پردیس نیک‌داد و همکاران

به‌منظور مشخص کردن مناسب‌ترین توزیع برازش‌یافته به رطوبت خاک لایه اول و دوم، ابتدا کل سری زمانی ماهانه در طول دوره مورد بررسی، ۲۰۲۱-۱۹۸۷، به صورت ۱۲ سری زمانی مربوط به هر ماه از سال تفکیک و برای هر ماه به صورت جداگانه توزیع مناسب‌تر مشخص شد. در جدول ۱، نام توزیع مناسب‌تر و سطح معنی‌داری با توجه به مقادیر p-value برای توزیع‌های مناسب‌تر به تفکیک ۴۰ ایستگاه مورد مطالعه و در ۱۲ ماه سال ارائه شده است.

در شکل ۵، بر اساس مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI، سه رخداد خشک‌سالی هواشناسی اصلی در سه دوره زمانی شامل، (مارس ۲۰۰۰- مارس ۲۰۰۲)، (مارس ۲۰۰۸- مارس ۲۰۰۹) و (دسامبر ۲۰۱۷- دسامبر ۲۰۱۸) در کل ایران رخ داده است. این رخدادهای بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی SSI1 و SSI2 در شکل ۵ نیز قابل مشاهده می‌باشند. شکل ۵ بیانگر پیروی رخدادهای خشک‌سالی کشاورزی بر اساس شاخص‌های SSI1 و SSI2 از رخدادهای خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص‌های SPEI و SPI دارد.

جدول ۱- نام توزیع مناسب و مقادیر p value توزیع گاما و توزیع مناسب روی متغیرهای الف) رطوبت خاک لایه اول و ب) لایه دوم.

Table 1. Superior distribution name and p-values of Gamma and superior distribution on soil moisture in layer 1 (a) and layer 2 (b).

| شماره ایستگاه<br>Station name<br>Number | تایم<br>Time         | الف - a           |                   |               |                |            |              |               |                 |                      |                  |                    |                    |
|---|----------------------|-------------------|-------------------|---------------|----------------|------------|--------------|---------------|-----------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|
|   |                      | ژانویه<br>January | فوریه<br>February | مارس<br>March | آوریل<br>April | مهر<br>May | ژوئن<br>June | جولای<br>July | اگوست<br>August | سپتامبر<br>September | اکتبر<br>October | نوامبر<br>November | دسامبر<br>December |
| ایستگاه‌های<br>Hyparrnet                | 1                    | BET               | BET               | WEI           | NOR            | NOR        | WEI          | LGS           | LGS             | LGS                  | BET              | BET                | BET                |
|   | 2                    | GEV               | LGS               | LGN           | BET            | NOR        | WEI          | NOR           | LGS             | LGS                  | GAM              | LGN                | EXP                |
|   | 3                    | WEI               | EXP               | BET           | EXP            | LGS        | EXP          | EXP           | EXP             | EXP                  | EXP              | EXP                | EXP                |
|   | 4                    | LGS               | LGS               | LGS           | WEI            | WEI        | WEI          | BET           | NOR             | NOR                  | LGS              | LGS                | LGS                |
|   | 5                    | LGS               | BET               | BET           | BET            | WEI        | BET          | LGS           | BET             | BET                  | BET              | BET                | WEI                |
|   | 6                    | GAM               | GEV               | BET           | LGN            | GEV        | GAM          | GEV           | LGS             | LGS                  | LGS              | NOR                | LGS                |
|   | 7                    | BET               | WEI               | NOR           | WEI            | NOR        | BET          | BET           | WEI             | NOR                  | WEI              | NOR                | LGS                |
|   | 8                    | LGS               | LGS               | LGS           | LGS            | BET        | LGS          | LGS           | NOR             | LGS                  | BET              | BET                | BET                |
|   | 9                    | LGN               | LGN               | LGN           | LGN            | LGN        | LGN          | LGN           | LGN             | LGN                  | LGN              | LGN                | LGN                |
|   | 10                   | BET               | LGS               | LGS           | NOR            | BET        | NOR          | NOR           | NOR             | NOR                  | NOR              | NOR                | NOR                |
|   | 11                   | LGS               | LGS               | LGS           | LGS            | LGS        | LGS          | LGS           | LGS             | LGS                  | LGS              | LGS                | LGS                |
|   | ایستگاه‌های<br>Avah  | 12                | GEV               | GAM           | LGS            | NOR        | BET          | WEI           | WEI             | WEI                  | NOR              | NOR                | NOR                |
| 13                                      |                      | LGS               | LGS               | BET           | LGS            | BET        | LGS          | BET           | BET             | BET                  | BET              | BET                | BET                |
| 14                                      |                      | NOR               | LGS               | LGS           | BET            | BET        | LGS          | NOR           | LGS             | LGS                  | LGS              | NOR                | LGS                |
| 15                                      |                      | LGS               | BET               | BET           | BET            | BET        | NOR          | NOR           | NOR             | NOR                  | NOR              | WEI                | LGS                |
| 16                                      |                      | GEV               | LGS               | GEV           | LGN            | LGN        | BET          | LGS           | LGS             | LGS                  | NOR              | LGS                | LGS                |
| 17                                      |                      | WEI               | NOR               | GEV           | LGN            | NOR        | NOR          | BET           | NOR             | NOR                  | LGS              | LGS                | GAM                |
| 18                                      |                      | LGS               | LGS               | BET           | LGN            | LGS        | BET          | BET           | NOR             | LGN                  | LGN              | LGN                | LGS                |
| 19                                      |                      | LGS               | NOR               | WEI           | NOR            | WEI        | BET          | WEI           | WEI             | WEI                  | NOR              | LGN                | LGS                |
| 20                                      |                      | LGN               | GAM               | BET           | LGN            | LGS        | BET          | BET           | NOR             | BET                  | LGS              | GEV                | WEI                |
| 21                                      |                      | WEI               | NOR               | BET           | LGN            | GEV        | GEV          | BET           | NOR             | WEI                  | LGN              | BET                | LGS                |
| 22                                      |                      | BET               | GAM               | BET           | BET            | WEI        | WEI          | NOR           | LGS             | LGS                  | LGS              | WEI                | LGS                |
| ایستگاه‌های<br>Semiart                  |                      | 23                | BET               | WEI           | LGS            | NOR        | LGS          | NOR           | LGS             | LGS                  | BET              | BET                | GAM                |
|   | 24                   | LGS               | BET               | LGN           | BET            | LGN        | LGN          | LGN           | LGN             | LGN                  | LGN              | LGN                | LGN                |
|   | 25                   | WEI               | LGS               | WEI           | LGS            | BET        | LGS          | WEI           | WEI             | WEI                  | WEI              | NOR                | BET                |
|   | 26                   | LGS               | WEI               | NOR           | BET            | NOR        | BET          | WEI           | WEI             | NOR                  | BET              | GEV                | LGS                |
|   | 27                   | BET               | LGS               | WEI           | BET            | BET        | GAM          | WEI           | BET             | LGS                  | BET              | GEV                | BET                |
|   | 28                   | BET               | LGS               | LGS           | BET            | BET        | GAM          | LGN           | BET             | BET                  | BET              | LGN                | NOR                |
|   | 29                   | LGS               | LGS               | BET           | BET            | NOR        | BET          | LGN           | EXP             | NOR                  | LGS              | LGS                | LGS                |
|   | 30                   | BET               | BET               | WEI           | NOR            | GEV        | LGS          | LGS           | GAM             | GAM                  | GAM              | WEI                | WEI                |
|   | 31                   | BET               | LGS               | BET           | BET            | LGS        | BET          | LGS           | LGN             | LGN                  | BET              | GEV                | BET                |
|   | 32                   | NOR               | NOR               | BET           | WEI            | BET        | LGS          | NOR           | BET             | GAM                  | BET              | LGS                | BET                |
|   | 33                   | NOR               | NOR               | NOR           | WEI            | LGS        | NOR          | WEI           | WEI             | WEI                  | LGS              | LGS                | NOR                |
|   | ایستگاه‌های<br>Humal | 34                | BET               | WEI           | NOR            | BET        | LGS          | LGS           | WEI             | NOR                  | BET              | LGS                | LGS                |
| 35                                      |                      | BET               | LGS               | WEI           | WEI            | GEV        | LGS          | LGS           | BET             | LGS                  | GAM              | LGS                | BET                |
| 36                                      |                      | LGS               | LGS               | LGN           | LGN            | LGS        | GEV          | BET           | BET             | BET                  | BET              | LGS                | LGS                |
| 37                                      |                      | BET               | LGS               | WEI           | BET            | WEI        | BET          | NOR           | NOR             | LGS                  | LGS              | WEI                | WEI                |
| 38                                      |                      | BET               | BET               | WEI           | BET            | LGS        | GEV          | BET           | LGS             | NOR                  | LGS              | LGS                | WEI                |
| 39                                      |                      | LGS               | GAM               | GAM           | GAM            | LGS        | GAM          | GAM           | GAM             | GAM                  | GAM              | GAM                | GAM                |
| 40                                      |                      | NOR               | NOR               | WEI           | WEI            | GAM        | LGN          | NOR           | WEI             | LGS                  | WEI              | WEI                | WEI                |

برازش معنی‌دار در سطح یک درصد    برازش معنی‌دار در سطح پنج درصد    برازش غیرمعنی‌دار    سطح معنی‌داری    راهنما

Significant at the 0.01 level    Significant at the 0.05 level    Non significant    Significant level    Legend

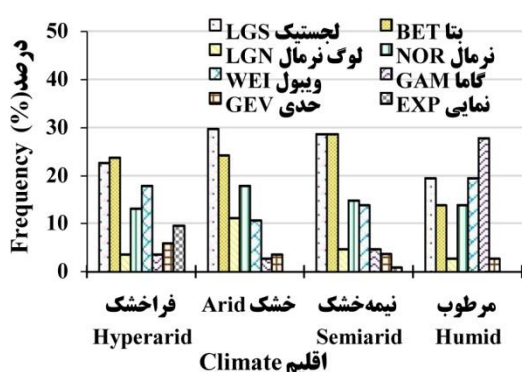
می‌باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد که توزیع گاما که معمولاً بدون بررسی به عنوان توزیع مناسب در محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی استفاده می‌شود، به ترتیب تنها در ۱۱ و ۵ درصد سری‌های زمانی

در جدول ۱، GAM توزیع گاما، LGN توزیع لوگ‌نرمال، LGS توزیع لجستیک، EXP توزیع نمایی، BET توزیع بتا، WEI توزیع ویبول، NOR توزیع نرمال و GEV توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته

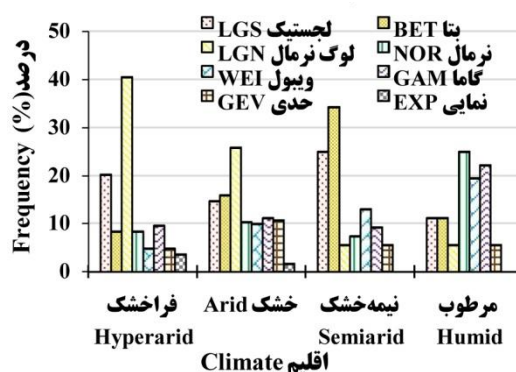
لایه دوم (جدول ۱-ب) سه توزیع مناسب برازش یافته با ۲۸، ۲۴ و ۱۶ درصد موارد به ترتیب توزیع‌های لجستیک، بتا و نرمال می‌باشند. به طور کلی برای پارامتر رطوبت خاک توزیع‌های لجستیک، بتا و لوگ نرمال به عنوان مناسب‌ترین توزیع‌های برازش یافته مشخص می‌شوند. درصد هر یک از توزیع‌های مناسب برازش یافته به رطوبت خاک در اقلیم‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.

رطوبت خاک لایه اول (جدول ۱-الف) و لایه دوم (جدول ۱-ب) به عنوان توزیع مناسب‌تر انتخاب شده است.

سه توزیع مناسب برازش یافته روی رطوبت خاک لایه اول (جدول ۱-الف) توزیع‌های لوگ نرمال، بتا و لجستیک به ترتیب با ۲۲، ۱۹ و ۱۸ درصد انتخاب شده به توزیع مناسب‌تر در کل ماه‌ها و ایستگاه‌های مورد بررسی می‌باشند. هم‌چنین برای رطوبت خاک



ب- رطوبت خاک لایه دوم Soil moisture layer 2

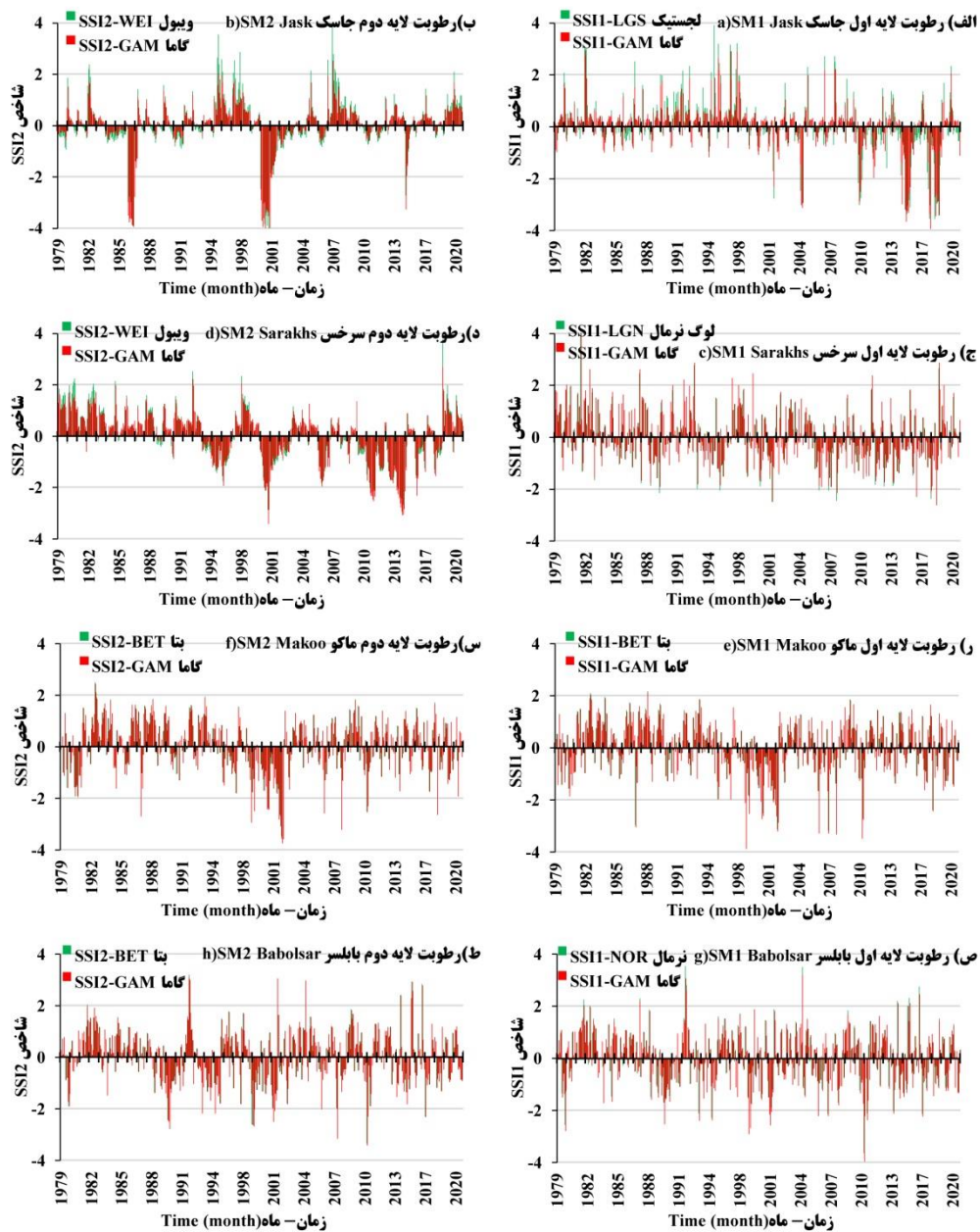


الف- رطوبت خاک لایه اول Soil moisture layer 1

شکل ۶- توزیع‌های احتمالاتی مناسب برازش یافته روی الف) رطوبت خاک لایه اول و ب) لایه دوم در اقلیم‌های مختلف ایران.  
Figure 6. The superior probability distribution fitted on soil moisture layer 1(a) and layer 2 (b) in various climates of Iran.

با توجه به تعداد زیاد شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی محاسبه شده (۴۸۰ شاخص) در پژوهش حاضر، در هر اقلیم یک ایستگاه، اقلیم فراخشک (ایستگاه جاسک)، اقلیم خشک (ایستگاه سرخس)، اقلیم نیمه‌خشک (ایستگاه ماکو) و اقلیم مرطوب (ایستگاه بابلسر)، به‌عنوان نمونه انتخاب و شاخص‌های SSI1 و SSI2 در مقیاس زمانی یک‌ماهه بر اساس توزیع‌های مناسب و گاما در آن‌ها رسم شده است (شکل ۷).

مناسب‌ترین توزیع برازش یافته روی رطوبت خاک لایه اول (شکل ۶-الف) در اقلیم‌های فراخشک، خشک، نیمه‌خشک و مرطوب به ترتیب توزیع لوگ نرمال، لوگ نرمال، بتا و نرمال است. در مورد رطوبت خاک لایه دوم (شکل ۶-ب) نیز به ترتیب توزیع‌های بتا، لجستیک، بتا و گاما به عنوان مناسب‌ترین توزیع‌های برازش یافته در اقلیم‌های فراخشک تا مرطوب مشخص می‌باشد.



شکل ۷- شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی در اقلیم‌های الف و ب- فراخشک (جاسک)، ج و د- خشک (سرخس)، ر و س- نیمه‌خشک (ماکو) و ص و ط- مرطوب (بابلسر) در لایه‌های اول و دوم خاک.

Figure 7. The Agricultural drought indices in Hyperarid-Jask (a, b), Arid-Sarakhs (c, d), Semiarid-Makoo (e, f) and Humid-Babolsar (g, h) climates for soil moisture layer 1 and 2.

استفاده‌شده در آن‌ها (مناسب یا گاما) در اقلیم‌های مرطوب‌تر نسبت به اقلیم‌های خشک‌تر، کم‌تر است. همچنین در یک اقلیم، تفاوت در شاخص SSI2 نسبت به SSI1 در اثر تغییر توزیع نمایان‌تر است.

بیشترین تفاوت بین شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی بر اساس توزیع‌های مناسب و گاما در اقلیم فراخشک (شکل ۷- الف و ب) مشاهده می‌شود. به‌عبارتی تفاوت مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی (SSI2 و SSI1) در اثر نوع توزیع

یکی از مهم‌ترین مشخصات خشک‌سالی، تعداد رخداد‌های خشک‌سالی اتفاق افتاده در طول دوره آماری موردبررسی است. اختلاف بین تعداد رخداد‌های خشک‌سالی کشاورزی بر مبنای شاخص‌های توزیع مناسب و گاما (تعداد رخداد توزیع مناسب منهای تعداد رخداد توزیع گاما) در مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه به تفکیک اقلیم‌های ایران در جدول ۲، ارائه شده است.

بررسی مقادیر شاخص‌های SSI1 و SSI2 در اقلیم‌های مختلف بیانگر طولانی‌تر بودن مدت خشک‌سالی کشاورزی براساس رطوبت لایه دوم خاک (۲۸-۷ سانتی‌متر) نسبت به رطوبت لایه اول خاک (۷-۰ سانتی‌متر) است. دلیل این امر می‌تواند تغییرات بیش‌تر رطوبت خاک در لایه اول با توجه به ضخامت کم‌تر و تأثیرپذیری بیش‌تر از تغییرات محیطی نسبت به رطوبت خاک در لایه دوم خاک باشد.

جدول ۲- تفاوت تعداد رخداد‌های خشک‌سالی در شاخص خشک‌سالی کشاورزی بر مبنای توزیع مناسب و گاما.

**Table 2. The difference number of drought events in agricultural drought indices based on superior and Gamma distribution.**

| اقلیم<br>Climate     | لایه<br>Layer | طبقه خشک‌سالی | خشک‌سالی        | خشک‌سالی       | خشک‌سالی         | ترسالی | ترسالی       | ترسالی     |             |
|----------------------|---------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|--------|--------------|------------|-------------|
|                      |               | Drought class | بسیار شدید      | شدید           | متوسط            | نرمال  | متوسط        | شدید       | بسیار شدید  |
|                      |               | مقیاس         | Extreme drought | Severe drought | Moderate drought | Normal | Moderate wet | Severe wet | Extreme wet |
| فراخشک<br>Hyper arid | اول<br>L1     | 1             | -6              | 0              | -3               | 2      | -5           | 3          | 9           |
|                      |               | 3             | -3              | -4             | 2                | -5     | 0            | 2          | 8           |
|                      |               | 6             | -2              | -5             | 5                | -9     | 1            | 5          | 6           |
|                      | دوم<br>L2     | 1             | -23             | 2              | 5                | -34    | 40           | 8          | 3           |
|                      |               | 3             | -8              | 3              | 3                | -16    | 13           | 0          | 6           |
|                      |               | 6             | -9              | -1             | 3                | -15    | 19           | -1         | 5           |
| خشک<br>Arid          | اول<br>L1     | 1             | -3              | -4             | -5               | -7     | 8            | 6          | 4           |
|                      |               | 3             | -4              | -6             | -3               | 3      | 3            | 2          | 5           |
|                      |               | 6             | -7              | -1             | -4               | -3     | 12           | 0          | 3           |
|                      | دوم<br>L2     | 1             | -12             | 5              | 10               | -12    | 4            | 3          | 2           |
|                      |               | 3             | -11             | 5              | 9                | -14    | 6            | 4          | 1           |
|                      |               | 6             | -12             | 4              | 7                | -9     | 8            | 2          | 0           |
| نیمه‌خشک<br>Semiarid | اول<br>L1     | 1             | -1              | 1              | 3                | -6     | 2            | 0          | 2           |
|                      |               | 3             | -2              | 1              | 0                | -2     | 1            | 0          | 1           |
|                      |               | 6             | -1              | -1             | -2               | 3      | 0            | 0          | 0           |
|                      | دوم<br>L2     | 1             | -4              | -1             | 6                | -5     | -2           | 4          | 2           |
|                      |               | 3             | -5              | 1              | 8                | -7     | -3           | 4          | 2           |
|                      |               | 6             | -3              | 3              | 7                | -12    | 2            | 4          | 0           |
| مرطوب<br>Humid       | اول<br>L1     | 1             | -1              | -3             | 4                | 1      | -3           | 1          | 1           |
|                      |               | 3             | -2              | 0              | 0                | 1      | -2           | 1          | 0           |
|                      |               | 6             | -1              | 0              | 0                | 2      | -2           | 0          | 1           |
|                      | دوم<br>L2     | 1             | 0               | -1             | 1                | -1     | 1            | 0          | 1           |
|                      |               | 3             | 0               | 0              | 0                | 1      | -1           | 1          | 0           |
|                      |               | 6             | 0               | 0              | 0                | 2      | -2           | 0          | 0           |

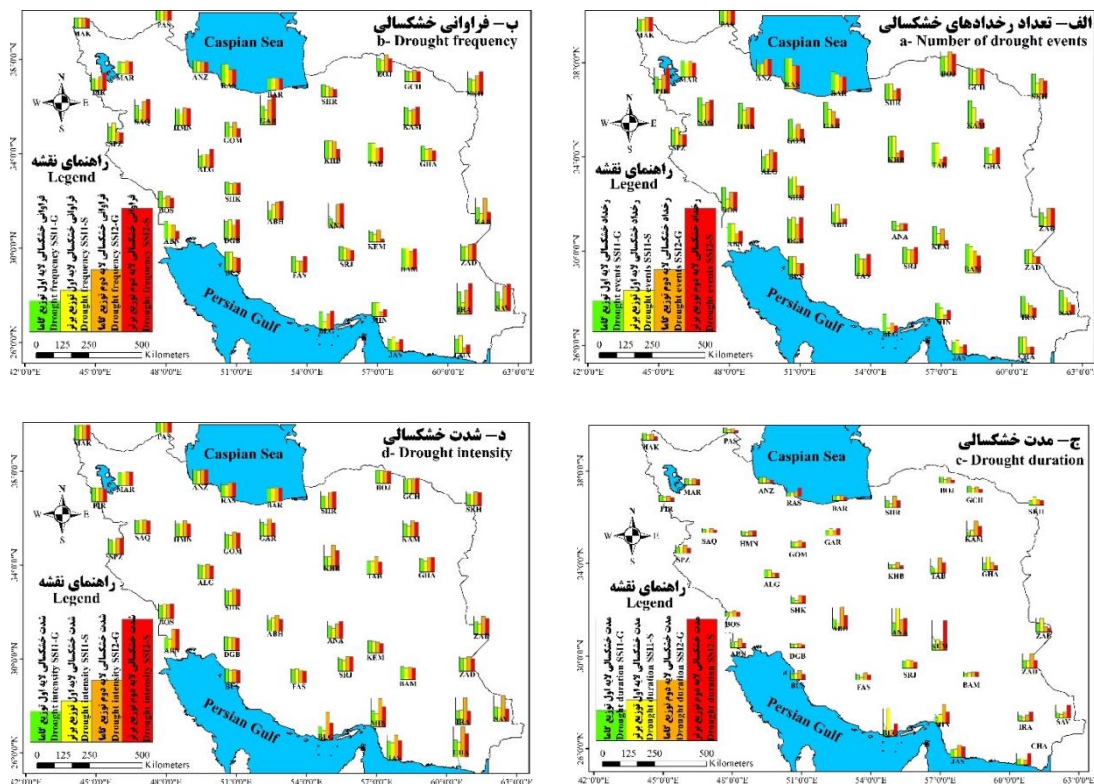


توزیع مناسب، در اقلیم‌های خشک نسبت به اقلیم مرطوب و در رطوبت خاک لایه دوم نسبت به لایه اول می‌باشد. به عبارت دیگر اهمیت تشخیص توزیع مناسب برای شاخص خشک‌سالی کشاورزی در اقلیم‌های خشک و متغیر رطوبت خاک لایه دوم بیشتر است. بر این اساس حداکثر اختلاف تعداد رخداد‌های ترسالی بسیار شدید در شاخص خشک‌سالی کشاورزی با توزیع گاما همواره کم‌تر از شاخص با توزیع مناسب می‌باشد (اعداد مثبت در جدول ۲). این نکته بیانگر بیشتر محاسبه شدن خشک‌سالی‌های بسیار شدید کشاورزی در شاخص با توزیع گاما نسبت به شاخص توزیع مناسب برای هر دو رطوبت خاک لایه اول و دوم است.

نکته‌ای که در جدول ۲، مشخص است، بیشتر بودن تفاوت بین رخداد‌های خشک‌سالی توزیع گاما و

با توجه به جدول ۲، تعداد رخداد‌های خشک‌سالی بسیار شدید در شاخص با توزیع گاما در تمامی اقلیم‌ها و در هر سه مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه همواره بیشتر از تعداد رخداد‌های خشک‌سالی بسیار شدید در شاخص با توزیع مناسب بوده است (اعداد با علامت منفی در جدول ۲). در حالی که تعداد رخداد‌های ترسالی بسیار شدید در شاخص خشک‌سالی کشاورزی با توزیع گاما همواره کم‌تر از شاخص با توزیع مناسب می‌باشد (اعداد مثبت در جدول ۲). این نکته بیانگر بیشتر محاسبه شدن خشک‌سالی‌های بسیار شدید کشاورزی در شاخص با توزیع گاما نسبت به شاخص توزیع مناسب برای هر دو رطوبت خاک لایه اول و دوم است.

نکته‌ای که در جدول ۲، مشخص است، بیشتر بودن تفاوت بین رخداد‌های خشک‌سالی توزیع گاما و



شکل ۸- الف) تعداد رخدادها، ب) فراوانی، ج) مدت و د) شدت شاخص خشک‌سالی کشاورزی ۶-ماهه رطوبت خاک لایه اول و دوم بر مبنای توزیع گاما و توزیع مناسب.

Figure 8. Number of events (a), frequency (b), duration (c) and intensity (d) of agricultural drought index with 6-month time scale based on Gamma and superior distribution.

شدت خشک‌سالی‌ها از شاخص بر مبنای توزیع گاما به شاخص بر مبنای توزیع مناسب در رطوبت لایه اول خاک از ۱/۵۳ به ۱/۴۴ (خشک‌سالی شدید به خشک‌سالی متوسط) و در رطوبت لایه دوم خاک از ۱/۹۱ به ۱/۶۵ کاهش می‌یابد (شکل ۸-د). به عبارتی شدت خشک‌سالی‌ها بر مبنای شاخص گاما نسبت به توزیع مناسب بیش‌تر است. بیش‌ترین شدت خشک‌سالی در شاخص‌های  $SSI_{1\%S}$ ،  $SSI_{1\%G}$ ،  $SSI_{2\%S}$  و  $SSI_{2\%G}$  در ایستگاه‌های جاسک، چابهار، بندرلنگه و آبادان و به ترتیب برابر ۲/۱۰، ۱/۶۶، ۳/۱۱ و ۲/۳۸ رخ داده است.

### نتیجه‌گیری کلی

هدف از مقاله حاضر اصلاح شاخص خشک‌سالی کشاورزی رطوبت خاک استاندارد شده (SSI) با انتخاب توزیع مناسب برازش‌یافته بر متغیر رطوبت خاک در اقلیم‌های مختلف ایران می‌باشد. در این راستا از داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه در ۴۰ ایستگاه سینوپتیک و داده‌های رطوبت خاک ماهانه در دو لایه اول (۷-۰ سانتی‌متر) و دوم (۲۸-۷ سانتی‌متر) از پایگاه ERA5 طی سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۷۹ استفاده شده است. پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز پژوهش، در مرحله دوم به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های پایگاه ERA5 مقادیر اندازه‌گیری شده سه متغیر بارش، دمای میانگین و تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از معیارهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین خطای اریبی (MBE) و شاخص پراکندگی (SI) با مقادیر دریافت شده از پایگاه ERA5 مقایسه شدند. در مرحله سوم پژوهش توزیع‌های مناسب‌تر برازش یافته روی متغیرهای رطوبت خاک لایه اول و دوم از بین ۴۹ توزیع مختلف در نرم‌افزار EasyFit 5.5 با انجام آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی‌داری یک و پنج درصد مشخص شدند. در ادامه

در حالی‌که حداقل تعداد رخداد‌های خشک‌سالی بر مبنای شاخص خشک‌سالی کشاورزی ۶-ماهه در ایستگاه‌های اقلیم فراخشک مانند ایستگاه انار و آباد و به ترتیب برابر ۴ و ۲ رخداد است. حداکثر تعداد رخداد‌های خشک‌سالی در ایستگاه‌های اقلیم مرطوب مانند ایستگاه رامسر برابر ۱۳ رخداد اتفاق افتاده است (شکل ۸-الف). به‌طورکلی تعداد رخداد‌های خشک‌سالی کشاورزی رخ داده بر اساس رطوبت خاک لایه اول نسبت به رطوبت خاک لایه دوم بیش‌تر و به ترتیب برابر ۸ و ۶ رخداد به‌طور میانگین در ۴۰ ایستگاه مورد بررسی طی سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۸۷ است. با تغییر توزیع گاما به توزیع مناسب برازش یافته، مقدار تفاوت ایجاد شده در تعداد رخداد‌های شاخص خشک‌سالی کشاورزی لایه اول خاک نسبت به لایه دوم خاک بیش‌تر می‌باشد.

میانگین فراوانی خشک‌سالی کشاورزی بر اساس شاخص‌های  $SSI_{1\%G}$ ،  $SSI_{1\%S}$ ،  $SSI_{2\%G}$  و  $SSI_{2\%S}$  در کل ایستگاه‌های مورد بررسی به ترتیب برابر ۱۲/۵، ۱۱/۰، ۱۲/۴ و ۱۲/۳ درصد می‌باشد (شکل ۸-ب). بر اساس این شاخص‌ها حداقل فراوانی خشک‌سالی در ایستگاه‌های آباد، انار، میناب و کرمان و به ترتیب برابر ۷، ۳، ۴ و ۲ درصد و حداکثر فراوانی در ایستگاه‌های ایرانشهر، بم، زابل و ایرانشهر و به ترتیب برابر ۱۸/۴، ۱۷/۸، ۲۱/۰ و ۲۵/۴ درصد است. کم‌ترین و بیش‌ترین مدت خشک‌سالی کشاورزی به ترتیب در ایستگاه‌های سنندج و انار به‌ترتیب برابر با ۱۸ و ۶۴ ماه رخ داده است (شکل ۸-ج). میانگین مدت خشک‌سالی کشاورزی بر اساس شاخص‌های  $SSI_{1\%G}$ ،  $SSI_{1\%S}$ ،  $SSI_{2\%G}$  و  $SSI_{2\%S}$  به ترتیب برابر ۲۸، ۳۱، ۳۸ و ۳۹ ماه است که بیانگر بیش‌تر بودن مدت خشک‌سالی در شاخص لایه دو رطوبت خاک و توزیع مناسب‌تر نسبت به توزیع گاما می‌باشد.

متغیر رطوبت خاک لایه دوم بیش‌تر است. به‌طوری‌که حداکثر اختلاف تعداد رخدادهای ترسالی متوسط در توزیع مناسب‌تر نسبت به شاخص توزیع گاما اتفاق برای شاخص SSI2 در مقیاس زمانی یک‌ماهه و اقلیم فراخشک با ۴۰ رخداد بیش‌تر اتفاق افتاده است. حداقل فراوانی خشک‌سالی در ایستگاه‌های آباده، انار، میناب و کرمان و به ترتیب برابر ۷، ۳، ۴ و ۲ درصد و حداکثر فراوانی در ایستگاه‌های ایرانشهر، بم، زابل و ایرانشهر و به ترتیب برابر ۱۸/۴، ۱۷/۸، ۲۱/۰ و ۲۵/۴ درصد است. کم‌ترین و بیش‌ترین مدت خشک‌سالی کشاورزی به ترتیب در ایستگاه‌های سندرگ و انار به ترتیب برابر با ۱۸ و ۶۴ ماه رخ داده است. شدت خشک‌سالی‌ها از شاخص بر مبنای توزیع گاما به شاخص بر مبنای توزیع مناسب‌تر در رطوبت لایه اول خاک از ۱/۵۳ به ۱/۴۴ (خشک‌سالی شدید به خشک‌سالی متوسط) و در رطوبت لایه دوم خاک از ۱/۹۱ به ۱/۶۵ کاهش می‌یابد. تغییر در مشخصات خشک‌سالی کشاورزی بر مبنای تغییر توزیع استفاده شده در محاسبه شاخص در اقلیم‌های خشک‌تر نسبت به اقلیم مرطوب و در رطوبت خاک لایه دوم نسبت به رطوبت خاک لایه اول بیش‌تر است. به‌طوری‌که در برخی موارد با توجه به نوع توزیع استفاده‌شده در محاسبه شاخص طبقه خشک‌سالی تغییر می‌یابد. به‌طورکلی نتایج پژوهش حاضر بیانگر ضرورت بررسی و انتخاب توزیع مناسب به‌جای توزیع گاما در محاسبه شاخص خشک‌سالی استانداردشده کشاورزی است.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه اراک که امکانات انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند تشکر می‌نمایند. هم‌چنین از داوران محترم این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود مقاله شده‌اند، تقدیر و تشکر می‌شود.

برای ۴۰ ایستگاه مورد مطالعه، ۱۲ شاخص SSI براساس مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه در دو لایه اول و دوم خاک بر مبنای توزیع گاما و توزیع مناسب محاسبه شده است. در مرحله نهایی پژوهش مشخصات خشک‌سالی شامل تعداد رخدادهای فراوانی، مدت و شدت خشک‌سالی برای تمامی شاخص‌ها محاسبه و در اقلیم‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. مقادیر ضریب تبیین بین دمای میانگین ماهانه اندازه‌گیری‌شده و بازتحلیل شده در تمامی ۴۰ ایستگاه مورد بررسی بیش‌تر از ۰/۹۸ و محدوده این ضریب برای پارامترهای بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی به ترتیب [۰/۰-۴۶/۹۱] و [۰/۰-۰۱/۸۹] به دست آمد. نتایج MBE بیانگر برآورد کم‌تر بارش در ایستگاه‌های اقلیم مرطوب نسبت به ایستگاه‌های اقلیم فراخشک و بیش‌برآوردی مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل پایگاه ERA5 در اقلیم‌های مرطوب نسبت به اقلیم فراخشک است. به‌طورکلی براساس معیار شاخص پراکندگی بیش‌ترین دقت داده‌های ERA5 به ترتیب مربوط به پارامترهای دما، تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش است. نتایج برازش توزیع‌ها نشان‌دهنده برازش معنی‌دار توزیع گاما به‌عنوان توزیع مناسب‌تر به ترتیب تنها در ۱۱ و ۵ درصد سری‌های زمانی رطوبت خاک لایه اول و دوم در ایستگاه‌های مختلف است. سه توزیع مناسب‌تر برازش‌یافته روی رطوبت خاک لایه اول توزیع‌های لوگ‌نرمال، بتا و لجستیک و برای رطوبت خاک لایه دوم به ترتیب توزیع‌های لجستیک، بتا و نرمال می‌باشند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین تفاوت بین شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی براساس توزیع‌های مناسب و گاما در اقلیم فراخشک و در شاخص SSI2 نسبت به SSI1 رخ می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر اهمیت تشخیص توزیع مناسب برای شاخص خشک‌سالی کشاورزی در اقلیم‌های خشک و

### داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه فوق‌لیسانس نویسنده اول می‌باشد که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به صورت، نویسنده اول: دانلود و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات و تهیه نسخه اولیه مقاله، نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، انجام آنالیزها و اصلاح

نهایی‌سازی مقاله، و نویسنده سوم: نظارت تحقیق، مشارکت در آنالیزها، و بازبینی مقاله است.

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

### حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است ولی از امکانات دانشگاه اراک استفاده شده است.

### منابع

1. Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water resources management*. 21: 5. 821-833.
2. Shahbazi, S., Bazrafshan, J., Irannejad, P., and Sohrabi, T. 2016. Palmer drought severity index's calibration under the climatic conditions of arid and semiarid regions of the West and South West of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*. 22: 5. 23-44. (In Persian)
3. Mosaedi, A., Mohammadi Moghaddam, S., and Kavakebi, Gh. 2017. Drought characteristics based on Reconnaissance Drought Index and its variations in different time periods and regions of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*. 23: 6. 27-52. (In Persian)
4. Sameti, M., Sanaei Nejad, S.H., Ghahraman, B., and Rivaz, F. 2019. Spatio-temporal Prediction of Drought using SPEI in North-East of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*. 26: 4. 115-133. (In Persian)
5. Ghorbani, Kh., Bararkhanpour, S., Valizadeh, E., and Molaarazi, A. 2020. Regional analysis of trend and change point in seasonal series of SPEI drought index in Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*. 27: 4. 185-200. (In Persian)
6. Zhao, R., Wang, H., Zhan, C., Hu, S., Ma, M., and Dong, Y. 2020. Comparative analysis of probability distributions for the Standardized Precipitation Index and drought evolution in China during 1961–2015. *Theoretical and Applied Climatology*. 139: 3. 1363-1377.
7. Mahmoudi, P., Ghaemi, A., Rigi, A., and Amir Jahanshahi, S.M. 2021. Recommendations for modifying the Standardized Precipitation Index (SPI) for drought monitoring in arid and semi-arid regions. *Water Resources Management*. 35: 10. 3253-3275.
8. Moienifar, S., Asadi, M.A., Maleki Nezhad, H., and Talebi, A. 2021. Determining the appropriate statistical distribution to calculate RDI in arid regions (Case study: Central Iran). *Journal of Arid Biome*. 11: 1. 105-121. (In Persian)
9. Nazeri, T.M., Khalili, K., and Behmanesh, J. 2015. Evaluation of

- common statistical distribution functions and the calculation methods of their parameters for estimating the probability of hydrological drought events (Case study: west of Lake Urmia Basin Rivers). *Water and Soil Science*. 25: 3. 155-168. (In Persian)
10. Jamal, M., Ebrahimi, H., and Jahromi, H.M. 2022. Effect of selecting the superior probability distribution in modifying streamflow drought index (SDI). *Arabian Journal of Geosciences*. 15: 8. 1-13.
  11. Salehi Tabas, M., Yaghoobzadeh, M., Zamani, G., and Amirabadi Zadeh, M. 2020. Estimation of Weekly Soil Moisture and Agricultural Drought for Future Periods Using DSSAT Model (Case Study: Birjand Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51: 3. 775-785. (In Persian)
  12. Cai, S., Song, X., Hu, R., Leng, P., Li, X., Guo, D., ... and Wang, Y. 2021. Spatiotemporal characteristics of agricultural droughts based on soil moisture data in Inner Mongolia from 1981 to 2019. *Journal of Hydrology*. 603: 127104.
  13. Navabi, N., Moghaddasi, M., and Gangi, N. 2021. Assessment of Agricultural Drought Monitoring Using Various Indices based on Ground-based and Remote Sensing Data (Case Study: Lake Urima Basin). *Watershed Engineering and Management*, 13: 1. 1-12. (In Persian)
  14. Tsiros, I.X., Nastos, P., Proutsos, N.D., and Tsaousidis, A. 2020. Variability of the aridity index and related drought parameters in Greece using climatological data over the last century (1900–1997). *Atmospheric Research*. 240: 104914.
  15. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 1979. Map of the world distribution of arid regions: map at scale 1:25,000,000 with explanatory note, MAB Technical Notes 7. UNESCO, Paris.
  16. Hershbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146: 730. 1999-2049.
  17. Li, M.F., Tang, X.P., Wu, W., and Liu, H. Bin. 2013. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Conversion and Management*. 70: 139-148.
  18. Javed, T., Li, Y., Rashid, S., Li, F., Hu, Q., Feng, H., and Pulatov, B. 2021. Performance and relationship of four different agricultural drought indices for drought monitoring in China's mainland using remote sensing data. *Science of the total environment*. 759: 143530.
  19. Hao, Z., and AghaKouchak, A. 2014. A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. *Journal of Hydrometeorology* 15: 1. 89-101.
  20. Mishra, A.K., and Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*. 391: 1-2. 202-216.
  21. Haile, G.G., Tang, Q., Leng, G., Jia, G., Wang, J., Cai, D., ... and Zhang, Q. 2020. Long-term spatiotemporal variation of drought patterns over the Greater Horn of Africa. *Science of the Total Environment*. 704: 135299.
  22. Wang, F., Wang, Z., Yang, H., and Zhao, Y. 2018. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI. *Science China Earth Sciences*. 61: 8. 1098-1111.
  23. Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., and Shen, Y. 2015. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*. 526: 253-264.
  24. Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., and Vogt, J. 2014. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*. 34: 8. 2792-2804.

