

Original Research Article

# Quantification as the first challenge of drought risk assessment and management

Sousan Heidari<sup>1</sup>, Mostafa Karimi<sup>2\*</sup>, Ghasem Azizi<sup>2</sup>, AliAkbar Shamsipour<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PhD student of climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran



10.22034/GRD.2023.20370.1588

**Received:**

July 30, 2023

**Accepted:**

October 16, 2023

**Keywords:**

Climatic hazards, Drought indices, Drought severity, Iran, Precipitation anomalies

## Abstract

The difference in the results of quantifying drought severity by different Indices can affect the assessment of vulnerability, risk and management of this important hazard. The aim of this research is to spatially compare the differences of climatic drought indices (RDI, DI, SPI, PNPI, ZSI, CZI, EDI, RDI, SPEI) and their effects in risk studies by calculating the Drought Hazard Index (DHI). For this purpose, the monthly and daily gridded reanalysis data of precipitation and temperature (ERA5) with the resolution of  $0.25 \times 0.25$  degrees were used. First, the percentage of the intensity area of the indices was extracted, and the difference of their spatial distribution was calculated. Then, to investigate the effect of these differences in the input of vulnerability and risk calculation, the drought hazard index was calculated based on the results of all the indices. The results showed that a) the indices estimate the severity of drought differently, b) these differences are more in normal conditions, c) according to the coefficient of variation statistics, the most differences were observed in extreme drought as well as the next order extreme wet and severe drought; in other words, extreme rainfall anomalies, d) extreme conditions (extreme drought and wet) are not properly estimated with EDI and SPEI indices, also e) the standard deviation of the negative intensities of the index (drought) is more than the intensities of wet. The use of intensities in the calculation of the DHI brought different results. Therefore, according to the results of the research, the use of indices, regardless of the limitations, will lead to different results in the assessment of vulnerability, damage and risk. It is suggested that a suitable and standard index be determined considering the country's geographic-climatic conditions and used in other studies.

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



\* **Corresponding Author:** Mostafa Karimi

**Address:** Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran

**Email:** Mostafakarimi.a@ut.ac.ir

## Extended Abstract

### 1. Introduction

Defining and measuring drought is a difficult concept. Perhaps, the most general definition of drought is "a specific period of abnormal rainfall in a specific area". In other words, a drought occurs when a significant water shortage is widespread in time and space. But there has long been disagreement over the details. Disputes about the concept of drought and the uncertainty of measuring its characteristics can be an obstacle to research and the planning related to drought. This shows that the qualitative and quantitative analysis of drought is a challenging issue. Although several studies have been conducted to evaluate drought indices around the world, the somewhat forgotten point is that drought indices sometimes do not provide the same results in estimating and quantifying the severity of drought. Using the estimates obtained from multiple indices as input for other similar studies, evaluating and managing the vulnerability and risk caused by this hazard, which is of great interest, and using its results in planning and even allocating budget and insurance coverage, makes the issue more important. Therefore, the present research focuses on meteorological drought indices as a basic drought monitoring indicator that requires limited variables (rainfall, and in some cases temperature) but is effective in other types of drought. The study also seeks to generally present (introduction, calculation details, required data) the main meteorological drought indices and to address the difference in the estimation and quantification of the drought index.

### 2. Research Methodology

To evaluate the severity of drought for the period of 1979-2021, precipitation and temperature were used as their main variables on daily and monthly scales according to the input of the indices. The indices were examined in the selected period of 2016-2017 when different regions of Iran were affected with drought and wetness. It should be noted that the beginning of the annual period is September. After the database was developed, the drought indices studied in the research were used to calculate the severity of the drought on an annual scale. The meteorological drought indices were classified into two categories of drought indices. In the last step, the drought hazard index was calculated, which expresses the severity of the drought event and is used as the first step to calculate the vulnerability and drought hazard index.

### 3. Results and discussion

The 12-month SPI drought intensity values are lower than the results of RAI, DI, and ZSI indices, which is a significant point considered as a disadvantage of this index. The estimation results of the ZSI index are almost equal to those of the RAI index, and the results of the CZI index are almost the same as those of the 12-month SPI index. According to the results of the EDI index, although this index can show the severity to some extent, it underestimates the severity of annual drought events. In addition, this index does not exactly correspond to the actual conditions caused by the drought. But it is used to identify the length of the period and the start and end of the drought, which is a great advantage. The spatial distribution of the RDI index estimate shows that half of the area in Iran had normal conditions in the year under review. In terms of space pattern, it is similar to the CZI index. The SPEI index, similar to SPI and EDI indices, has not estimated the end of extreme conditions (very severe drought and wets).

The coverage percentages of drought severity in ZSI, CZI, and RAI indices are almost close to one another, while the intensity of the EDI index is different from those of the other indices. According to the internal standard deviation, it seems that RAI, DI, and ZSI indices can more appropriately estimate drought conditions.

In addition to the mentioned cases, the comparison between the intensities of the investigated indices showed that the differences among normal conditions, droughts and wets are greater, and, as the intensity increases, the differences decrease. The drought hazards resulting from the drought indices were found to have significant differences.

### 4. Conclusion

According to the results, although the three indices RAI, DI, and ZSI perform closely, the drought indices (RAI, DI, SPI, PNPI, ZSI, CZI, EDI, RDI, SPEI) used for the selected year estimate the drought intensities differently. The difference in drought intensities was more in normal conditions, wet and weak droughts. The standard

deviation for the negative intensities of the index (drought) is more than that of drought conditions. Calculating the severity of drought hazard (DHI) using the intensity results obtained from the indices showed a significant and sometimes extreme difference in this estimate. Estimation of drought intensity is also done in other important studies on the vulnerability, loss, and risk caused by drought. These differences and, as a result, the difference in results can affect environmental planning and management and economic considerations such as budget allocation and insurance coverage. Therefore, it is very important to check the accuracy of estimating drought intensities using indices. Although the aim of the current research was not to introduce an appropriate drought index and it tried to show the differences among the estimations of the indices, it seems that the RAI and ZSI indices are more suitable for estimating the severity of annual drought in Iran. There have been studies aimed at achieving a suitable index, but no acceptable index has been introduced in the diverse geographical-climatic area of a country, which shows the need for a more comprehensive study in this field.

مقاله پژوهشی

## کمی‌سازی، چالش اولیه ارزیابی و مدیریت ریسک خشکسالی

سوسن حیدری<sup>۱</sup>، مصطفی کریمی<sup>۲\*</sup>، قاسم عزیزی<sup>۲</sup>، علی‌اکبر شمس‌پور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
<sup>۲</sup> گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.



10.22034/GRD.2023.20370.1588

### چکیده

اختلاف حاصله از کمی‌سازی شدت خشکسالی به‌وسیله شاخص‌های متفاوت، می‌تواند برآورد آسیب‌پذیری، ریسک و مدیریت این مخاطره مهم را متأثر کند. با توجه به این، هدف تحقیق حاضر، مقایسه فضایی تفاوت شاخص‌های خشکسالی اقلیمی (EDI, RDI, SPEI, ZSI, CZI, EDI, RDI, SPEI) و اثر این تفاوت‌ها در مطالعات ریسک با محاسبه شاخص مخاطره خشکسالی (DHI) بوده است. به این منظور از داده‌های ماهانه و روزانه بارش و دمای بازتحلیل شبکه‌بندی (ERA5) با قدرت تفکیک  $0.25 \times 0.25$  درجه استفاده شد. ابتدا درصد مساحت شدت شاخص‌ها استخراج و تفاوت توزیع فضایی آن‌ها ترسیم، سپس به‌منظور بررسی اثر این تفاوت‌ها در ورودی محاسبه آسیب‌پذیری و ریسک، شاخص مخاطره خشکسالی بر اساس نتایج هر ۹ شاخص محاسبه گردید. نتایج نشان داد که شاخص‌ها؛ الف) شدت‌های خشکسالی را متفاوت برآورد نموده‌اند. ب) این تفاوت‌ها در نقطه تعادل شاخص (محدوده نرمال) بیشتر و با افزایش شدت، تفاوت‌ها کمتر شده ج) بیشترین ضریب تغییرات، در خشکسالی بسیار شدید و در مرتبه بعد در ترسالی بسیار شدید و خشکسالی شدید با به عبارتی بی‌هنجاری‌های حدی بارش مشاهده گردید. د) برآورد شرایط حدی انتهایی در شاخص‌های EDI و SPEI مناسب نبود. ه) انحراف معیار گستره‌های شدت‌های منفی شاخص بیش از ترسالی بوده است. علاوه بر این استفاده از شدت‌ها در محاسبه شاخص مخاطره خشکسالی، نتایج متفاوتی به‌دست داد. بنابراین طبق نتایج تحقیق استفاده هر یک از شاخص‌ها بدون توجه به محدودیت‌ها، دربرآورد آسیب‌پذیری، خسارت و ریسک، منجر به نتایج متفاوتی خواهد شد. پیشنهاد می‌گردد شاخص یا شاخص‌های مناسب و استاندارد با دز نظر گرفتن شرایط جغرافیایی-اقلیمی کشور تعیین و در دیگر مطالعات مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۷/۲۴

کلیدواژه‌ها:

ایران، بی‌هنجاری بارش، شاخص‌های خشکسالی، شدت خشکسالی، مخاطرات اقلیمی



\*نویسنده مسئول: مصطفی کریمی

ایمیل: Mostafakarimi.a@ut.ac.ir

آدرس: گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
ایران.

## ۱ مقدمه

تعریف و اندازه‌گیری خشکسالی مفهومی دشوار است. شاید کلی‌ترین تعریف خشکسالی به «کمبود بارش در یک دوره خاص نسبت به میانگین بلندمدت بارش، در یک منطقه خاص» اشاره دارد (بران و رودیر<sup>۱</sup>، ۱۹۸۵؛ روستا و همکاران، ۲۰۲۰ ب)، به عبارت دیگر خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که کمبود آب قابل‌توجهی در زمان و مکان گسترش می‌یابد (کوریا<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۱). اما اختلاف نظر، از مدت‌ها پیش در مورد جزئیات وجود داشته است (عسگری مارنانی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیم<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ میشر و سینگ<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰؛ پارسونز<sup>۶</sup> و ویلهات و گلانتز<sup>۷</sup>، ۱۹۸۵) اختلاف‌ها در مورد مفهوم خشکسالی و عدم قطعیت اندازه‌گیری ویژگی‌های آن می‌تواند مانعی برای تحقیقات (ویلها و گلانتز، ۱۹۸۵؛ یوجویچ<sup>۸</sup>، ۱۹۷۸) و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با خشکسالی باشد. این نشان می‌دهد که تحلیل کیفی و کمی خشکسالی یک موضوع چالش‌برانگیز است.

اولین مطالعه ثبت‌شده خشکسالی در حدود سال ۱۸۶۱ بر اساس تغییرات بارندگی انجام شده است (دیوی<sup>۹</sup>، ۱۸۶۱). به گفته هیم<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۲) تلاش‌های اولیه جهت پایش خشکسالی، بیشتر متمرکز بر بارش بوده است. در اواخر سال ۱۹۷۵، فریدمن<sup>۱۱</sup> از بارش سالانه به عنوان پایش خشکسالی در مطالعه خشکسالی در تگزاس استفاده کرد (فریدمن، ۱۹۵۷).

همچنین معیارهای مشابهی در کشورهای دیگر: (۱) انگلیس: ۱۵ روز متوالی با کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر (۰/۰۱ اینچ)، (۲) هند: نصف بارش نرمال یا کمتر برای یک هفته، یا کمبود بارش واقعی بیش از دو برابر انحراف میانگین، (۳) روسیه: عدم میزان بارش بیشتر از ۵ میلی‌متر برای ۱۰ روز، (۴) جزیره بالی: یک دوره ۶ روزه بدون بارش و (۵) لیبی: میزان بارش سالانه کمتر از ۱۸۰ میلی‌متر به کاررفته است (هیم<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۲).

در دهه اول قرن بیستم، اداره هواشناسی ایالات متحده، بارش ۳۰ درصد یا کمتر از حد نرمال در هر دوره ۲۱ روزه یا بیشتر (الیور و فریبرج<sup>۱۳</sup>، ۱۹۸۷) را معیار خشکسالی معرفی کرد. مهم‌ترین معیار برای تعیین خشکسالی، تمرکز بر میزان یا کمبود بارش از حالت نرمال یا درصد نرمال (هیز<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۹؛ هیم، ۲۰۰۲) در یک دوره زمانی مشخص بوده است (بهالم و مولی<sup>۱۵</sup>، ۱۹۸۰؛ تنهیل<sup>۱۶</sup>، ۱۹۴۷؛ ویلهات و گلانتز، ۱۹۸۵). اکثر این تعاریف و آستانه‌های بارشی برای همان منطقه موردبررسی معتبر بودند و ممکن است در مناطق دیگر قابل‌استفاده نباشد، زیرا شرایط اقلیمی که منجر به رخداد خشکسالی می‌شود در سراسر جهان متفاوت است.

بعدها برای ارزیابی خشکسالی از شاخص‌ها استفاده شد (تنهیل، ۲۰۰۲؛ اشتاینمن<sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۵). یک شاخص خشکسالی، تعیین روشی برای استخراج اطلاعات مستتر و مرتبط با خشکسالی است که می‌تواند مقایسه شرایط فعلی با گذشته نیز باشد. بنابراین، شاخص‌ها برای پایش و کمی‌سازی بهتر خشکسالی ایجاد شده‌اند (هیم، ۲۰۰۲؛ کالیس<sup>۱۸</sup>، ۲۰۰۸). لازم به ذکر است که توسعه شاخص‌ها باهدف دستیابی به یک عدد یا مقداری (به‌طورمعمول یک مقدار بی‌بعد) است که در اصل بیانی از شدت خشکسالی نیز است. تاکنون شاخص‌های متعددی که هر یک از آن‌ها بر اساس به‌کارگیری متغیرهای هواشناسی و در مواردی محیطی و روش‌های محاسباتی متفاوتی ایجاد و توسعه یافته‌اند (هیم، ۲۰۰۲)؛ که توصیف ویژگی‌های خشکسالی از جمله: شدت، گستره، فراوانی و تداوم را ارائه می‌دهند (هیز، ۲۰۱۲؛ کیم و همکاران؛ ۲۰۱۱؛ لئو<sup>۱۹</sup> و همکاران؛ ۲۰۱۶؛ سان<sup>۲۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ یائو<sup>۲۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰).

در سال ۱۹۹۷ انجمن هواشناسی آمریکا (AMS<sup>۲۲</sup>) انواع خشکسالی را به چهار دسته تقسیم کرد: خشکسالی هواشناسی یا اقلیم‌شناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی-اجتماعی. انواع خشکسالی‌ها مستقل و جدا از هم نبوده بلکه به رویکردهای مختلف در استفاده از داده‌ها و روش‌های شناسایی اشاره دارند (ویلها و گلانتز، ۱۹۸۵). پایش انواع خشکسالی معمولاً بر مبنای آمار و اطلاعات اقلیمی و محیطی استوار است که در نقاط معدودی برداشت می‌شوند که ماهیت نقطه‌ای دارند. اما به دلیل تعداد کم و پراکنش نامناسب ایستگاه‌ها احتمال دقت پایش خشکسالی کاهش می‌یابد. بنابراین پایش این مخاطره براساس داده‌ها و فناوری‌های متفاوت مورد استفاده، نیز جدا می‌شوند. برای نمونه، تعداد قابل‌توجهی از شاخص‌ها از داده‌های دورسنجی (ماهواره‌ای) در اواخر قرن بیستم (شفیلد<sup>۲۳</sup> و

<sup>13</sup> Oliver & Fairbridge

<sup>14</sup> Hayes

<sup>15</sup> Bhalme & Mooley

<sup>16</sup> Tannehill

<sup>17</sup> Steinemann

<sup>18</sup> Kallis

<sup>19</sup> Liu

<sup>20</sup> Sun

<sup>21</sup> Yao

<sup>22</sup> American Meteorological Society

<sup>23</sup> Sheffield

<sup>1</sup> Beran & Rodier

<sup>2</sup> Correia

<sup>3</sup> Askarimarnani

<sup>4</sup> Kiem

<sup>5</sup> Mishra & Singh

<sup>6</sup> Parsons

<sup>7</sup> Wilhite & Glantz

<sup>8</sup> Yevjevich

<sup>9</sup> Davy

<sup>10</sup> Heim

<sup>11</sup> Friedman

<sup>12</sup> Heim

همکاران، ۲۰۱۸) و همچنین شاخص‌های مبتنی بر داده‌های پایگاه‌های شبکه‌بندی شده در مقیاس جهانی از جمله پایگاه داده جهان (CRU) دانشگاه آنجلس شرقی انگلستان و پایگاه داده SPEI اسپانیا برای عموم در دسترس است.

سازمان هواشناسی جهانی با جامعه مشارکت جهانی آب (GWP) در سال ۲۰۱۶ کتابچه راهنمای شاخص‌های خشکسالی را با تمرکز بر مفهوم، داده‌ها و روش‌های محاسبه شاخص‌های خشکسالی جهت پشتیبانی علمی کشورهای در حال توسعه منتشر کرد (سوبودا و فوکس، ۲۰۱۶).

علاوه بر آن، در مرور شاخص‌های خشکسالی می‌توان به منابع متعددی از جمله: آلی<sup>۳</sup> (۱۹۸۴)، ویلهات و گلانتز (۱۹۸۵)، هیم (۲۰۰۰) و (۲۰۰۲)، مشیرا و سینگ (۲۰۱۰)، زرگر<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، بونسال<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، آگواتا<sup>۶</sup> (۲۰۱۴)، اسلامیان<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، کچوک<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۱) وسوبودا و فوکس (۲۰۱۶) مراجعه نمود.

با وجود تلاش‌های مستمر در زمینه توسعه شاخص‌های خشکسالی، اما همچنان، سوال‌های مهم و ضروری برای محققین به خصوص محاسبه کمی شدت خشکسالی که مورد استفاده دیگر مطالعات قرار می‌گیرد، مطرح است.

باتوجه به بحث‌های مطرح‌شده، گرچه مطالعات متعددی در ارتباط با ارزیابی شاخص‌های خشکسالی در کشور انجام گرفته است و تعداد محدودی از آن‌ها شاخص‌هایی برای مناطق مختلف معرفی کرده‌اند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سعیدیان، ۱۴۰۱؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰؛ بازگیر و همکاران، ۱۳۹۹؛ وخشوری و همکاران، ۱۳۹۶؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۱؛ آزادی و سلطانی، ۱۳۹۳). با این حال در اکثر مطالعات به‌ویژه سازمان‌های اجرایی، شاخص SPI و SPEI به‌عنوان شاخص مرجع برای کمی سازی شدت خشکسالی و لازم جهت مطالعات خسارت و ریسک این مخاطره استفاده می‌شود. از آنجایی که برآوردهای به‌دست آمده از شاخص‌ها به‌عنوان ورودی دیگر مطالعات مانند ارزیابی و مدیریت آسیب‌پذیری و ریسک ناشی از این مخاطره و همچنین در برنامه‌ریزی و مدیریت، مورد استفاده قرار می‌گیرد، اهمیت موضوع را افزایش می‌دهد. بنابراین پژوهش حاضر با تمرکز بر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی- اقلیم‌شناسی به‌عنوان شاخص‌های پایه پایش خشکسالی سعی دارد، با محاسبه شدت شاخص‌های، استخراج درصد مساحت شدت‌ها و در نهایت محاسبه شاخص مخاطره خشکسالی، ضمن ارائه تفاوت‌های فضایی مقادیر کمی شدت خشکسالی، به این سؤال پاسخ دهد که اختلاف برآوردها در کدام طبقه-شدت‌ها بیشتر بوده و مهم‌تر این که اختلاف در شدت‌ها منجر به چه میزان اختلاف در محاسبه شاخص مخاطره خشکسالی که می‌تواند منجر به نتایج متفاوت در تخمین آسیب‌پذیری و ریسک شود، می‌گردد.

## ۲ مبانی نظری

گرچه استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در انواع ایستگاه‌های پایش جو و اقلیم در مطالعات اقلیمی مرسوم است. ولی در سال‌های اخیر سازمان‌های تحقیقاتی بین‌المللی با استفاده از داده‌های ایستگاهی، ماهواره‌ای، مدل و دیگر منابع، پایگاه داده جوی- اقلیمی متعدد و پراکند که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد را تهیه نموده‌اند. یکی از این پایگاه داده‌ها، نسل پنجم (ERA5) داده‌های شبکه‌بندی شده بازتحلیل پایگاه داده‌های ECMWF است که مجموعه داده‌های شبکه‌بندی شده آن با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و تفکیک زمانی ساعتی و ماهانه در دسترس است (هرسباخ<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). این داده‌ها با توزیع شبکه‌ای منظم، به‌طور مؤثر خطاهای ناشی از درون‌یابی ایستگاه‌های هواشناسی را جبران می‌کند. دقت این داده‌ها بخصوص بارش، در مطالعات مختلفی بررسی و آن را مناسب (جیانگ<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۱؛ رخموتوا<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱) و استفاده از آن را توصیه نموده‌اند (تقی‌زاده<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱؛ ایزدی و همکاران، ۲۰۲۱). براین اساس در گام نخست بعد از تشکیل پایگاه داده به‌منظور ارزیابی نتایج شدت شاخص‌های خشکسالی از داده‌های پایگاه مذکور در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۱ برای متغیرهای اصلی بارش و دما در مقیاس روزانه و ماهانه با توجه به ورودی شاخص‌ها استفاده گردید. برای نمایش و تحلیل شرایط شدت خشکسالی برآوردی به‌وسیله شاخص‌ها، سال آبی ۲۰۱۶-۲۰۱۷ که مناطق مختلف کشور هم‌زمان تحت تأثیر خشکسالی (مرکز، شمال شرق و شمال غرب)، ترسالی (جنوب، زاگرس شمالی و ناحیه غربی سواحل جنوبی دریای خزر) و شرایط نرمال بوده‌اند، انتخاب گردیده است (کریمی و حیدری، ۱۴۰۲، سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶؛ روستا و همکاران، ۲۰۲۰ الف).

در این پژوهش ۹ شاخص خشکسالی مبتنی بر داده‌ای اقلیمی استفاده شد. روش محاسبه شاخص‌های مورد استفاده و جزئیات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده بر مبنای متغیر ورودی به دو دسته تک متغیره (شاخص‌های ۱ الی ۷، جدول ۱) که بارش تنها متغیر ورودی در محاسبه آن‌ها است، شامل: شاخص بی‌هنجاری بارندگی (RAI) که در سه مقیاس زمانی

<sup>7</sup> Eslamian

<sup>8</sup> Kchouk

<sup>9</sup> Hersbach

<sup>10</sup> Jiang

<sup>11</sup> Rakhmatova

<sup>12</sup> Taghizadeh

<sup>1</sup> Climatic Research Unit

<sup>2</sup> Svoboda & Fuchs

<sup>3</sup> Alley

<sup>4</sup> Zargar

<sup>5</sup> Bonsal

<sup>6</sup> Agwata

ماهانه، فصلی یا سالانه محاسبه می‌شود (اسماختین و هیوز<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴)، شاخص دهک (DI)، که فقط طبقه‌بندی مقادیر بارش است، شاخص بارش استاندارد (SPI)، درصد بارش نرمال یا بی‌هنجاری بارش (PNPI)، نسبت مجموع بارش ماهانه، فصلی و ماهانه به متوسط بارش بلندمدت همان مقیاس، شاخص Z-Score (ZSI)، شاخص (China-Z)، شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) که برای محاسبه تجمع روزانه آب با یک تابع وزنی باگذشت زمان توسعه یافته است. دسته دیگر شاخص‌های خشکسالی چند متغیره هستند که علاوه بر بارش که متغیر اصلی ورودی در محاسبه آنها است، متغیرهای دیگر از جمله تبخیر و تعرق را نیز در محاسبات لحاظ می‌کنند (۸ الی ۹، جدول ۱). از بین آنها دو شاخص RDI (رحمت<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) و SPEI که توسط ویسنته-سرانو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شد بر پایه تبخیر و تعرق پتانسیل، بارش و بارش استاندارد می‌باشند (جدول ۱). تبخیر و تعرق محاسبه شده در پژوهش حاضر با روش تورنت وایت بوده است.

بعد از محاسبه شاخص‌های خشکسالی مورد اشاره در بالا، درصد مساحت شدت‌های مختلف (ترسالی-خشکسالی) در سال آبی منتخب ۲۰۱۶-۲۰۱۷ استخراج و شدت شاخص در ۹ طبقه؛ نرمال (N)، و به ترتیب خشکسالی و ترسالی، ضعیف (WD, WW)، متوسط (MD, MW)، شدید (SD, SW) و بسیار شدید (ED, EW) دسته‌بندی گردید. در گام نهایی شاخص مخاطره خشکسالی (HDI<sup>۴</sup>) که نمایانگر شدت رخداد خشکسالی است و به‌عنوان مرحله نخست محاسبه شاخص آسیب‌پذیری و ریسک خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، براساس نتایج محاسبات شدت‌های خشکسالی سالانه ۹ شاخص مورد اشاره در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۱، محاسبه شد (رابطه ۱).

نتایج شاخص مخاطره خشکسالی که به‌عنوان ورودی برآورد آسیب‌پذیری و ریسک مورد استفاده است، در صورت تفاوت شاخص‌های مختلف خشکسالی می‌تواند مقادیر خروجی آسیب‌پذیری و ریسک متفاوتی به دست دهد. برای محاسبه این شاخص ابتدا برای هر طبقه از شاخص براساس مقادیر درصد احتمال وقوع، رتبه ۱ تا ۴ اختصاص می‌یابد. همچنین برای طبقات شدت خشکسالی نیز به ترتیب از شدت ضعیف به بسیار شدید نیز وزن ۱ تا ۴ داده می‌شود (کیم<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵).

$$DHI = (WD_r \times WD_w) + (MD_r \times MD_w) + (SD_r \times SD_w) + (ED_r \times ED_w) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که DHI شاخص مخاطره خشکسالی، WD خشکسالی ضعیف، MD خشکسالی متوسط، SD خشکسالی شدید، ED خشکسالی بسیار شدید، r: رتبه رخدادهای W وزن مربوط به هر شدت است.

جدول ۱- شاخص‌های خشکسالی هواشناسی-اقلیمی مورد بررسی در پژوهش

منبع	داده	معادله	شاخص	ردیف
Van Rooy 1965	P	$RAI = \pm 3 \times \frac{P_i - \bar{P}}{E - \bar{P}}$	Rainfall Anomaly Index (RAI)	۱
Gibbs and Maher 1967	P	$P_i = \left( \frac{i}{N+1} \times 100 \right)$	Deciles Index (DI)	۲
McKee et al. 1993	P	$g(X) = \frac{X^{\alpha-1} \times e^{-\frac{X}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \times \Gamma(\alpha)}$ for $X > 0$	Standardized Precipitation Index (SPI)	۳
Willeke et al. 1994	P	$PNPI = \frac{P_i}{\bar{P}} \times 100$	Percent of Normal Index (PNPI)	۴
Triola 1995	P	$Z\text{-score} = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma}$	Z-Score drought Index (ZSI)	۵
Xiaosheng et al. 1997	P	$CZI = \frac{6}{Csi} \left( \frac{Csi}{2} \psi Si + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{Csi} + \frac{Csi}{6}$	China Z Index (CZI)	۶
Byun and Wilhite 1999	P	$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[ \left( \sum_{m=1}^n \frac{P_m}{n} \right) / n \right] \cdot EDI$ $= \frac{DEP}{\sigma DEP}$	Effective Drought Index (EDI)	۷

<sup>4</sup> Drought Hazard Index

<sup>5</sup> Kim

<sup>1</sup> Smakhtin & Hughes

<sup>2</sup> Rahmat

<sup>3</sup> Vicente-Serrano

Tsakiris 2004	P, PET	$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad i = 1 \text{ to } N. RDI_n^{(i)}$ $= \frac{\alpha_k^{(i)}}{\alpha_k} - 1$	Reconnaissance Drought Index (RDI)	۹
Vicente-Serrano et al. 2010	P, PET	$SPEI = w \frac{C_0 + C_1 w + C_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} w =$ $-2 \ln(p)$	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	۱۰

$\bar{P}$ : میانگین بارش یک دوره زمانی،  $E$ : ده مورد از بزرگترین و کوچکترین بارشهای یک دوره زمانی،  $N$ : تعداد داده‌های بارش،  $P_i$  زمانی، دور یک بارش معیار انحراف:  $\sigma$ : بارش یک دوره زمانی،  $PET$ : تبخیر و تعرق پتانسیل،  $Z$  score:  $\psi si$ : بارش مؤثر،  $EP_i$ : بارش مؤثر،  $m-1$ : بارش تا  $P_m$  مداوم فرضی،  $DEP$ : انحراف بارش مؤثر،  $\sigma DEP$ : انحراف استاندارد بارش مؤثر،  $\alpha$  چولگی، ضریب  $Csi$  و  $\beta$ : پارامترهای توزیع گاما داده‌ها،  $X$ : مقدار تجمعی بارش،  $\alpha_k$  میانگین حسابی مقادیر  $\alpha_k^{(i)}$  در سال‌های مورد بررسی

### ۳ یافته‌ها و بحث

با هدف مقایسه برآورد شدت خشکسالی، ۹ شاخص اصلی خشکسالی هواشناسی-اقلیمی در سال آبی ۲۰۱۷-۲۰۱۶ مورد محاسبه قرار گرفت. بر اساس گزارش بارش کشور (سازمان هواشناسی، ۱۳۹۶)، شرایط بارشی سال آبی منتخب به گونه‌ای بوده است که بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی کوچک و بزرگ در مناطق مختلف ایران وجود داشته، بنابراین می‌تواند ملاک مناسبی به منظور مقایسه شدت‌های بی‌هنجاری در دوسوی مثبت (ترسالی) و منفی (خشکسالی) باشد.

به طورکل، در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۶، توزیع فضایی RAI نشان از وقوع ترسالی ضعیف تا بسیار شدید در جنوب و خشکسالی ضعیف تا بسیار شدید در مرکز و شمال شرق کشور دارد. نکته مهم در نتایج، تفاوت برآوردها، در شدت بی‌هنجاری بارش، به ویژه بی‌هنجاری منفی در شاخص‌های مختلف است (شکل ۱). گرچه در تمام شاخص‌ها، در جنوب ایران ترسالی مشاهده می‌شود، اما شدت این ترسالی‌ها یکسان نیست.

شاخص‌های RDI، EDI و SPEI12 شدت ترسالی و مساحت تحت پوشش را کمتر برآورد نموده‌اند. مقدار برآورده شده RDI بیشتر از EDI و SPEI12 است. زیرا شدت انتهایی در این دو شاخص برآورد نگردیده است. شرایط ترسالی مناطق شمال غرب زاگرس و جنوب البرز مرکزی در این دو شاخص استخراج نشده است. طبقات مقادیر کمی شدت خشکسالی، پراکندگی فضایی بیشتری نسبت به ترسالی دارند و دارای اختلاف برآورد بیشتری هستند (شکل ۱).

مقادیر شدت شاخص خشکسالی SPI12 ماهه نسبت به نتایج شاخص‌های RAI، DI و ZSI کمتر بوده به طوری که پهنه‌های شدت‌های ضعیف و متوسط افزایش و در مقابل خشکسالی شدید دیگر دیده نمی‌شود. اما خشکسالی بسیار شدید در مرکز و شرق نمایان است. شاید این نکته از معایب این شاخص محسوب گردد که بعضی شدت‌ها را برآورد نکرده و در دیگر طبقات جای داده است.

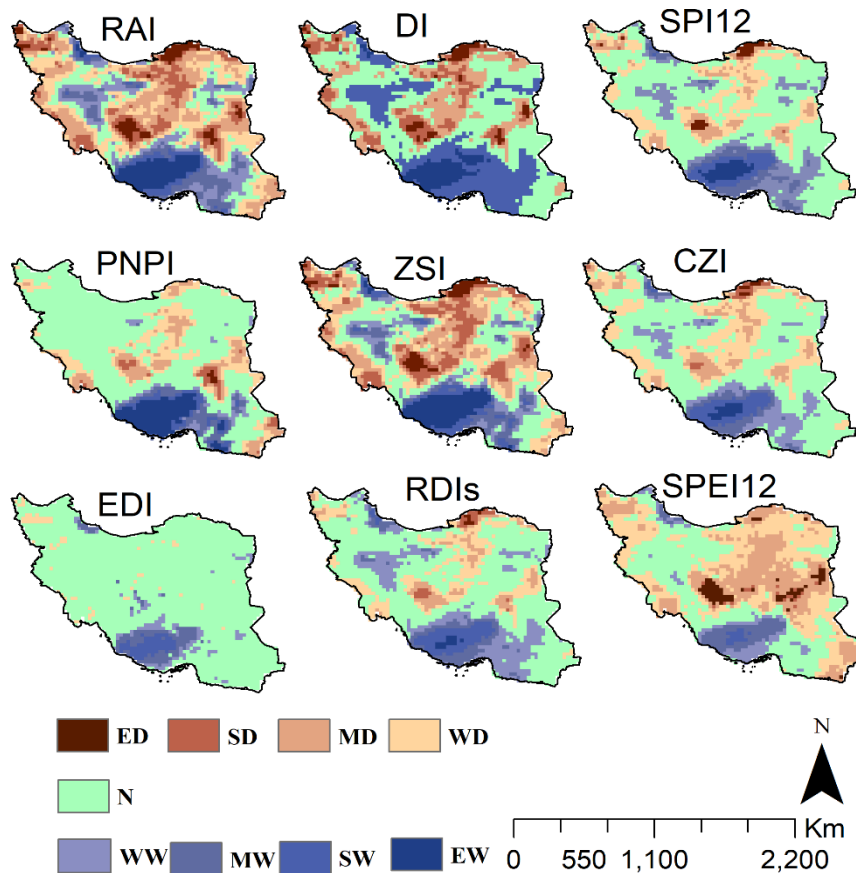
برخی از محققین این شرایط را که ناشی از ماهیت روش محاسبه این شاخص یعنی متحرک بودن محاسبه مقادیر بارش و تأثیرپذیری بارش هر دوره از دوره قبل از خود را از معایب آن ذکر کرده‌اند (مک‌کی<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۳) که منجر به مقادیر گمراه‌کننده از شاخص SPI به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که ماه‌های زیادی با بارش صفر دارند، خواهد شد (گزل‌خو و همکاران، ۱۴۰۰؛ وو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین وقوع بارش بیش از نرمال، پیش از شروع دوره خشک، می‌تواند مقدار این شاخص را با وجود رخداد خشکسالی، نرمال یا حتی ترسالی نشان دهد (گزل‌خو و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج مطالعات بازگیر و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داد که استفاده از SPI بایستی با دقت بیشتری صورت گیرد (بازگیر و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر موارد بیان شده مقایسه بین شدت‌های برآورد شده (جدول و شکل ۲) نیز نشان می‌دهد که تفاوت‌ها در شرایط نرمال و خشکسالی‌های ضعیف بیشتر بوده و هر چه شدت افزایش یابد این تفاوت کمتر می‌شود.

در بین شاخص‌ها، درصد مساحت شدت شاخص‌های ZSI، CZI و RAI تقریباً به هم نزدیک‌تر است. نتایج پژوهش هدایتی دزفولی و صداقت کردار (۱۳۸۶) نیز نشان داد که شاخص‌های CZI و ZSI رفتار مشابهی نشان می‌دهند (هدایتی دزفولی و صداقت کردار، ۱۳۸۶). درحالی که پهنه‌های شدت شاخص EDI متفاوت‌تر از بقیه شاخص‌ها است (شکل و جدول ۲).

2 Wu

<sup>1</sup> McKee





شکل ۱- توزیع فضایی شدت شاخص‌های خشکسالی در سال آبی (۲۰۱۶-۲۰۱۷)

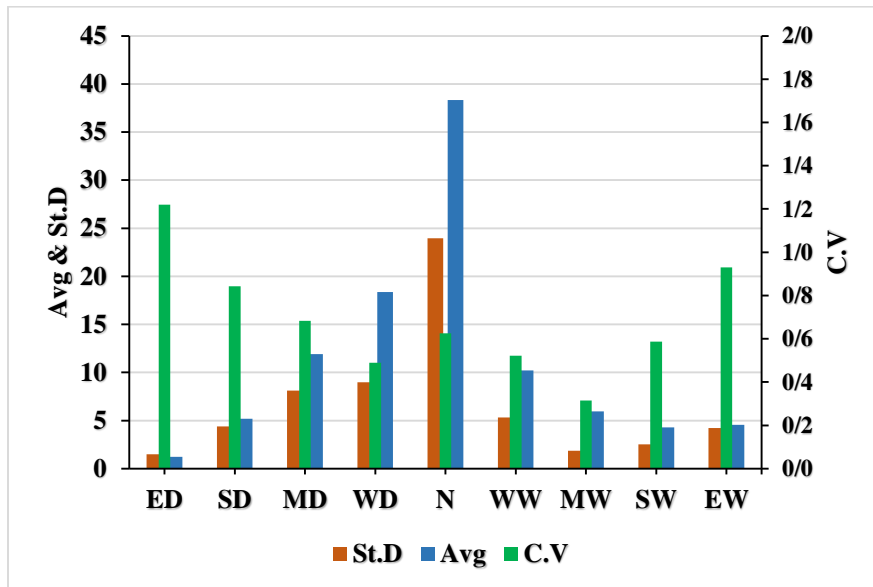
جدول ۲- درصد مساحت شدت شاخص‌ها، ستون آخر میزان انحراف شاخص و دو سطر آخر به ترتیب میزان انحراف و ضریب تغییرات هر یک از شدت‌ها است.

StD	EW	SW	MW	WW	N	WD	MD	SD	ED	
۶/۵	۶/۶	۳/۳	۸/۶	۱۳/۲	۱۲/۵	۲۰/۹	۲۱	۱۰/۲	۳/۸	RAI
۴/۴	۱۲/۴	۹/۹	۸/۶	۱۰/۲	۱۳/۷	۱۴/۳	۱۸/۸	۹/۳	۲/۸	DI
۱۵	۲/۴	۴/۱	۵/۶	۱۳/۴	۴۸/۱	۱۷/۸	۶/۸	۱/۶	۰/۱	SPI3
۱۷/۹	۷/۴	۲/۸	۴/۲	۳	۵۷/۵	۱۴/۲	۸/۷	۲	۰/۳	PNPI
۶/۸	۷/۴	۴/۵	۷/۳	۸/۷	۲۳/۱	۱۷	۱۷/۶	۱۱/۶	۲/۹	ZSI
۱۰/۷	۴/۱	۵/۴	۳/۲	۱۷/۷	۲۳/۸	۳۱/۷	۶/۳	۶/۸	۰/۹	CZI
۲۷/۹	۰	۲/۸	۴/۹	۴/۳	۸۵/۳	۲/۷	۰	۰	۰	EDI
۱۵/۸	۰/۶	۴/۸	۵/۶	۱۶/۲	۵۰/۳	۱۵/۳	۵/۴	۱/۴	۰/۳	RDI
۱۳/۳	۰	۰/۸	۵/۴	۵/۲	۳۰/۸	۳۱/۵	۲۲/۶	۳/۸	۰	SPEI
	۴/۲	۲/۵	۱/۹	۵/۳	۲۳/۹	۹	۸/۱	۴/۴	۱/۵	StD
	۰/۹	۰/۶	۰/۳	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۷	۰/۸	۱/۲	CV

علاوه بر موارد ذکر شده با در نظر گرفتن انحراف معیار درونی، به نظر می‌رسد شاخص‌های RAI، DI و ZSI برآورد مناسب‌تری از شرایط خشکسالی داشته‌اند که با پژوهش حجازی‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) و وخشوری و همکاران (۱۳۹۶) مطابق و همسو است. این در حالی

است که در بیشتر مطالعات انجام شده بدون در نظر گرفتن نتایج شاخص، تنها به بررسی وضعیت خشکسالی‌ها با شاخص SPI و SPEI پرداخته شده است (فرچزاده و احمدیان، ۱۳۹۳؛ نصرتی ۱۳۹۳).

اما با توجه ضریب تغییرات (سطر آخر جدول ۲) که آماره‌ای بی بعد بوده و همانند انحراف معیار بزرگی مقادیر مورد بررسی در برآورد انحراف داده‌ها نقشی ندارد و برای مقایسه نمایه مناسب‌تری از انحراف معیار است، بیشترین تغییرات در شدت خشکسالی بسیار شدید و در مرتبه بعد در ترسالی بسیار شدید و خشکسالی شدید یا به عبارتی بی‌هنجاری‌های حدی بارش دیده می‌شود.



شکل ۲- میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات درصد مساحت شدت شاخص‌ها

همان‌طور که در هدف تحقیق ذکر شد، برآورد متفاوت از شدت خشکسالی می‌تواند منجر به تولید نتایج متفاوتی در تخمین مخاطره، آسیب‌پذیری و درنهایت ریسک گردد. به همین منظور شاخص مخاطره خشکسالی (DHI) با استفاده از نتایج برآورد ۹ شاخص منتخب، جهت مقایسه نتایج، محاسبه گردید که نتایج آن در شکل و جدول ۳ آمده است.

با توجه به اختلاف در پهنه‌های برآورد شدت خشکسالی شاخص‌ها انتظار می‌رود نتایج شاخص مخاطره خشکسالی منتج از آن‌ها تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشته باشند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر DHI به دست آمده از شاخص‌های ۹ گانه گاه انحراف‌های بالایی دارند. نزدیک به ۹۵ درصد DHI حاصل از شاخص EDI و در شاخص PNPI نزدیک به ۴۵ درصد در طبقه کم بوده، درحالی‌که در دیگر شاخص‌ها این مقدار زیر ۱۰ درصد و حتی نزدیک به صفر بوده است. شدت درصد مساحت مخاطره خشکسالی متوسط مقادیر نزدیک‌تری به یکدیگر نشان می‌دهد، اما در همین طبقه نیز اختلاف‌های بزرگی دیده می‌شود. درحالی‌که DHI حاصل از شاخص DI نزدیک ۱۰۰ درصد پهنه آن را دربرگرفته ولی برای شاخص EDI این مقدار نزدیک ۴ درصد است.

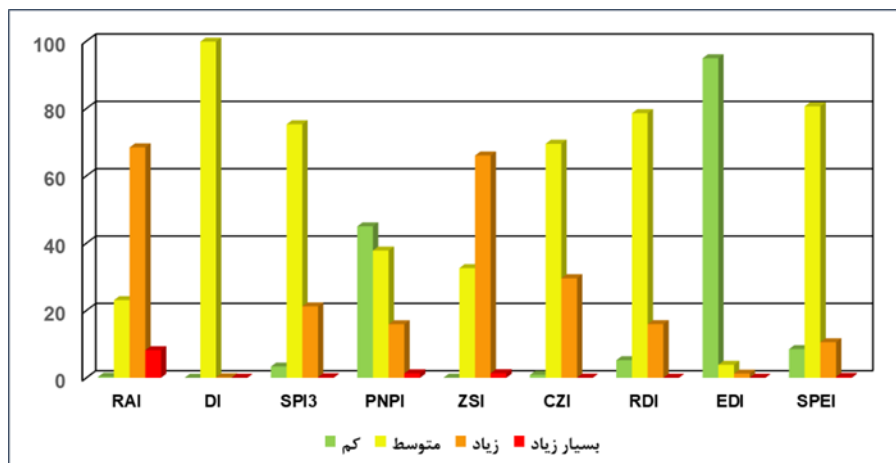
جدول ۳- مقادیر درصد مساحت شاخص مخاطره خشکسالی (DHI) شاخص‌ها در سال آبی (۲۰۱۶-۲۰۱۷) ستون آخر جدول میزان انحراف در طبقات DHI و دو سطر آخر به ترتیب انحراف و ضریب تغییرات هر طبقه DHI است.

Std	بسیار زیاد	زیاد	متوسط	کم	
۳۰/۴۵	۸/۱۹	۶۸/۴۳	۲۳/۰۵	۰/۳۲	RAI
۴۹/۷۱	۰	۰/۳۶	۹۹/۵۶	۰	DI
۳۴/۷۹	۰/۱۶	۲۱/۲۰	۷۵/۳۰	۳/۳۳	SPI3
۲۰/۰۵	۱/۳۳	۱۵/۹۰	۳۷/۷۹	۴۴/۹۸	PNPI
۳۱/۲۱	۱/۳۷	۶۶/۰۲	۳۲/۵۷	۰/۰۴	ZSI
۳۲/۷۰	۰/۰۴	۲۹/۵۶	۶۹/۵۲	۰/۸۸	CZI
۴۶/۶۳	۰	۱/۲۴	۳/۸۶	۹۴/۹۰	EDI
۳۶/۳۸	۰	۱۵/۹۴	۷۸/۵۹	۵/۲۲	RDIs
۳۷/۳۶	۰/۲۸	۱۰/۵۶	۸۰/۶۴	۸/۵۱	SPEI

۸/۸۵	۲/۶۶	۲۵/۳۹	۳۲/۱۷	۳۲/۳۳	Std
۰/۲۵	۲/۱۰	۱	۰/۵۸	۱/۸۴	CV

مقدار DHI بسیار زیاد در حد ۸ درصد مساحت حاصل از شاخص RAI به دست آمده است. اما شاخص‌های مانند DI، EDI و RDIs شاخص مخاطره (DHI) بسیار زیاد برآورد نداشته‌اند. گرچه PNPI و بعد ZSI به ترتیب با انحراف برآوردی ۲۰ و ۳۱ درصد، کمترین پراکنش درونی برآورد DHI را داشته‌اند، اما شاخص PNPI نزدیک سه چهارم DHI را کم و متوسط درحالی که شاخص ZSI تقریباً نزدیک به ۱۰۰ درصد مقدار DHI را زیاد و متوسط برآورد نموده است.

اگرچه میزان انحراف‌های طبقات کم تا شدید DHI بالا بوده ولی با توجه به میزان ضریب تغییرات می‌توان گفت که به علت برآورد ناشی از شاخص RAI در این طبقه که چندبرابر دیگر مقادیر است، شاخص مخاطره بسیار زیاد نیز پراکنش بالایی داشته است. اما به هر حال اختلاف‌های بسیار زیاد به‌ویژه در DHI کم (شکل ۳) و تا حدودی در دیگر طبقات آن، می‌تواند مؤید چالش مطرح شده در مقدمه که شاخص‌های خشکسالی مقادیر متفاوتی از شدت خشکسالی را کمی نموده و این نتایج در استفاده در دیگر بخش‌های می‌تواند نتایج غیرقابل قبول و گاه گمراه کننده به دنبال داشته باشد.



شکل ۳- تفاوت برآورد درصد مساحت شاخص مخاطره خشکسالی (DHI) در شاخص‌ها، سال آبی (۲۰۱۶-۲۰۱۷)

## ۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برطبق نتایج به دست آمده می‌توان گفت گرچه نتایج سه شاخص RAI، DI و ZSI به هم نزدیک‌تر بوده ولی شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده (RAI، DI، SPI، PNPI، ZSI، CZI، EDI، RDI، SPEI) در سال منتخب، شدت‌های خشکسالی را متفاوت برآورد نموده‌اند. تفاوت شدت‌های خشکسالی بیشتر در شرایط نرمال، ترسالی و خشکسالی‌های ضعیف بوده است. انحراف معیار گستره‌های شدت‌های منفی شاخص (خشکسالی) بیشتر از شرایط ترسالی است. به منظور بررسی اثر اختلاف شاخص‌ها در مطالعات آسیب‌پذیری و ریسک شدت مخاطره خشکسالی (DHI) با استفاده از نتایج شدت به دست آمده از شاخص‌ها محاسبه شد که نتایج نشان داد تفاوت معنی‌دار و گاه فاحش در برآوردها وجود دارد. برآورد شدت خشکسالی در مطالعات مهم دیگر همچون محاسبه آسیب‌پذیری، خسارت و ریسک ناشی از خشکسالی مورد استفاده می‌باشند. این اختلاف‌ها و در نتیجه تفاوت برآوردهای ناشی از آن، می‌تواند برنامه‌ریزی و مدیریت محیطی و اقتصادی را تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه هدف تحقیق حاضر معرفی شاخص مناسب خشکسالی نبوده و سعی داشته اختلاف در برآورد شاخص‌ها را نمایان کند، ولی براساس نتایج به دست آمده از جدول ۲ و ۳، به نظر می‌رسد شاخص‌های RAI و ZSI برای برآورد شدت خشکسالی سالانه مناسب‌تر باشند. اما قابل ذکر است که برای چنین نتیجه‌گیری نیاز به ارزیابی شاخص‌ها در یک دوره آماری بلندمدت است. هرچند مطالعاتی با هدف دستیابی به شاخص مناسب صورت گرفته ولی شاخصی که در پهنه متنوع جغرافیای-اقلیمی ایران مورد تأیید و مقبول باشد معرفی نگردیده که این امر نیاز مطالعات جامع‌تر را در این زمینه بیش از پیش نمایان می‌کند.

## References

- Agwata, J. (2014). A review of some indices used for drought studies. *Civil and Environmental Research*, 6(6), 4-21.
- Alley, W. M. (1984). The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(7), 1100-1109. [doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2).
- Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N., & Hrisanthou, V. (2012). Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Water resources management*, 26, 2453-2473. [doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0](https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0).
- Askarimarnani, S. S., Kiem, A. S., & Twomey, C. R. (2021). Comparing the performance of drought indicators in Australia from 1900 to 2018. *International Journal of Climatology*, 41, E912-E934. [doi.org/10.1002/joc.6737](https://doi.org/10.1002/joc.6737).
- Azadi, S. and Soltani, S. (2014). Calibration and Zonation of Palmer Index Climatic Coefficients for Drought Risk Management in Natural Ecosystems (Wetlands) of Iran. *Iranian journal of Ecohydrology*, 1(1), 35-46. [doi.org/10.22059/IJE.2014.52524](https://doi.org/10.22059/IJE.2014.52524). (In Persian).
- Bazgeer, S., Asadi Oskouei, E., Abbasi, F., Rezazadeh, P., & Haghghat, M. (2021). Comparative Study of Efficiency of Some Meteorological Drought Indices in Different Climate Regions of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11), 2751-2760. [Doi.org/10.22059/IJSWR.2020.301067.668581](https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.301067.668581). (In Persian).
- Beran, M., & Rodier, J. (1985). Hydrological aspects of drought. UNESCO/WHO, Studies and Reports in Hydrology, No. 39. In: UNESCO, Paris, France.
- Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108 (8), 1197-1211.
- Bonsal, B. R., Wheaton, E. E., Chipanshi, A. C., Lin, C., Sauchyn, D. J., & Wen, L. (2011). Drought research in Canada: A review. *Atmosphere-Ocean*, 49(4), 303-319. [doi.org/10.1080/07055900.2011.555103](https://doi.org/10.1080/07055900.2011.555103).
- Correia, F. N., Santos, M. A., & Rodrigues, R. R. (1991). Reliability in regional drought studies. Paper presented at the Water resources engineering risk assessment. [doi.org/10.1007/978-3-642-76971-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-76971-9_3).
- Davy, J. (1861). X.—On an Unusual Drought in the Lake District in 1859. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 22(2), 313-318. [doi.org/10.1017/S0080456800030635](https://doi.org/10.1017/S0080456800030635).
- Eslamian, S., Ostad-Ali-Askari, K., Singh, V. P., Dalezios, N. R., Ghane, M., Yihdego, Y., & Matouq, M. (2017). A review of drought indices. *Int. J. Constr. Res. Civ. Eng*, 3, 48-66. [doi.org/10.20431/2454-8693.03\\_04005](https://doi.org/10.20431/2454-8693.03_04005).
- Farajzadeh, M., & Ahmadian, K. (2014). Temporal and Spatial Analysis of Drought with use of SPI Index in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 1-16. (In Persian).
- Friedman, D. G. (1957). The prediction of long-continuing drought in south and southwest Texas: Travelers Insurance Company.
- Gozalkhoo, M., Mohammadi, H., Borna, R., & Asadian, F. (2022). Meteorological drought analysis with SPI correction index in arid climate (Case study of central, southern and eastern Iran). *Physical Geography Research Quarterly*, 53(4), 465-485. (In Persian).
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wardlow, B. D., Anderson, M. C., & Kogan, F. (2012). Drought monitoring: Historical and current perspectives.

- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wihite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429-438. [doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2).
- Hedayati Dezfuli, A., Sedaghat Kerdar, A. (2008). Comparative comparison of three drought indices in different climates of Iran. *Nivar*. 32(66-67), 64-74. (In Persian).
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. [doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149](https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149).
- Heim, R. (2000). Drought indices: a review. *Drought: a global assessment*, 159-167.
- Hejazizadeh, Z., Pajoo, F., & Shakiba, H. (2021). Analyzing the accuracy of drought indicators and determining the best climatic indicators in southeastern Iran. *Geography*, 19(68), 5-21. (In Persian).
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J.,... Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. [doi.org/10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).
- IRAN Meteorological Organization. (2017). National Center of Climate and Drought crisis Management. [https://ndc.irimo.ir/far/index.php?module=web\\_directory&wd\\_id=1608](https://ndc.irimo.ir/far/index.php?module=web_directory&wd_id=1608)
- Izadi, N., Karakani, E.G., Saadatabadi, A.R., Shamsipour, A., Fattahi, E., Habibi, M. (2021). Evaluation of ERA5 Precipitation Accuracy Based on Various Time Scales over Iran during 2000–2018. *Water*, 13(2538), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w13182538>.
- Jiang, Q. Coauthors, 2021: Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland. *J. Hydrol*, 595, 125660. [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660).
- Kallis, G. (2008). Droughts. *Annual review of environment and resources*, 33, 85-118. [doi.org/10.1146/annurev.enviro.33.081307.123117](https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.33.081307.123117).
- Karimi, M., & Heidari, S. (2023). Variability and trend of changes in the severity-area of drought and wet in Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(36), 129-150. [Doi.org/10.22111/JNEH.2022.42519.1905](https://doi.org/10.22111/JNEH.2022.42519.1905). (In Persian).
- Kchouk, S., Melsen, L. A., Walker, D. W., & van Oel, P. R. (2021). A review of drought indices: Predominance of drivers over impacts and the importance of local context. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 1-28. [doi.org/10.5194/nhess-2021-152](https://doi.org/10.5194/nhess-2021-152).
- Khosravi, M., Movaqqari, A. and Mansouri Daneshvar, M.R. (2013). Evaluating the PNI, RAI, SIP AND SPI indices in mapping drought intensity of Iran: Comparing the interpolation method and digital elevation model (DEM). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(4), 53-70. (In Persian).
- Kiem, A. S., Johnson, F., Westra, S., van Dijk, A., Evans, J. P., O'Donnell, A.,... Thyer, M. (2016). Natural hazards in Australia: droughts. *Climatic Change*, 139, 37-54. [doi.org/10.1007/s10584-016-1798-7](https://doi.org/10.1007/s10584-016-1798-7).
- Kim, H., Park, J., Yoo, J., & Kim, T.-W. (2015). Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: A case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(1), 28-35. [doi.org/10.1016/j.her.2013.07.003](https://doi.org/10.1016/j.her.2013.07.003).
- Kim, S., Kim, B., Ahn, T. J., & Kim, H. S. (2011). Spatio-temporal characterization of Korean drought using severity–area–duration curve analysis. *Water and Environment Journal*, 25(1), 22-30. [doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00184.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00184.x).

- Liu, Z., Menzel, L., Dong, C., & Fang, R. (2016). Temporal dynamics and spatial patterns of drought and the relation to ENSO: a case study in Northwest China. *International Journal of Climatology*, 36(8), 2886-2898. [doi.org/10.1002/joc.4526](https://doi.org/10.1002/joc.4526).
- Liu, Z., Wang, Y., Shao, M., Jia, X., & Li, X. (2016). Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. *Journal of hydrology*, 534, 281-299. [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.003](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.003).
- Mahmoudi, P., Rigi, A. and Miri Kamak, M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 3123-3138. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02778-z>.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Paper presented at the Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216. [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012).
- Nosrati, K. (2014). Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for Drought Identification in Different Climates of IranK. *Environmental Sciences*, 12(4). (In Persian).
- Oliver, J. E., & Fairbridge, R. W. (1987). *The encyclopedia of climatology* (Vol. 986): Van Nostrand Reinhold New York.
- Panu, U., & Sharma, T. (2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S1), S19-S30. [doi.org/10.1080/02626660209493019](https://doi.org/10.1080/02626660209493019).
- Parsons, D. J., Rey, D., Tanguy, M., & Holman, I. P. (2019). Regional variations in the link between drought indices and reported agricultural impacts of drought. *Agricultural systems*, 173, 119-129. [doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.015](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.015).
- Rahmat, S. N., Jayasuriya, N., & Bhuiyan, M. (2015). Assessing droughts using meteorological drought indices in Victoria, Australia. *Hydrology Research*, 46(3), 463-476. [doi.org/10.2166/nh.2014.105](https://doi.org/10.2166/nh.2014.105).
- Rakhmatova, N., Arushanov, M., Shardakova, L., Nishonov, B., Taryannikova, R., Rakhmatova, V., & Belikov, D. A. (2021). Evaluation of the perspective of ERA-Interim and ERA5 reanalyses for calculation of drought indicators for Uzbekistan. *Atmosphere*, 12(5), 527. [doi.org/10.3390/atmos12050527](https://doi.org/10.3390/atmos12050527).
- Rousta, I., Olafsson, H., Moniruzzaman, M., Ardö, J., Zhang, H., Mushore, T. D., ... & Azim, S. (2020a). The 2000–2017 drought risk assessment of the western and southwestern basins in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1201-1221. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00751-8>.
- Rousta, I., Saberi, M. A., Mahmood, S. A. R., Moghaddam, M. M., Olafsson, H., Krzyszczyk, J., & Baranowski, P. (2020b). Climate change impacts on vegetation and agricultural drought in the basin of Panjshir River in Afghanistan. *Climate Change Research*, 1(4), 77-88. [doi.org/10.30488/CCR.2020.253624.1029](https://doi.org/10.30488/CCR.2020.253624.1029).
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724-9758. [doi.org/10.1029/2017WR022437](https://doi.org/10.1029/2017WR022437).

- Smakhtin, V. U., & Hughes, D. (2004). Review, automated estimation and analyses of drought indices in South Asia.
- Steinemann, A. C., Hayes, M. J., & Cavalcanti, L. F. (2005). Drought indicators and triggers. *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*, Wilhite DA (ed), 71-92.
- Sun, S., Li, Q., Li, J., Wang, G., Zhou, S., Chai, R., ... Lou, W. (2019). Revisiting the evolution of the 2009–2011 meteorological drought over Southwest China. *Journal of hydrology*, 568, 385-402. [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.071](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.071).
- Svoboda, M. D., & Fuchs, B. A. (2016). *Handbook of drought indicators and indices: World Meteorological Organization Geneva, Switzerland*.
- Taghizadeh, E., Ahmadi-Givi, F., Brocca, L., & Sharifi, E. (2021). Evaluation of satellite/reanalysis precipitation products over Iran. *International Journal of remote sensing*, 42(9), 3474-3497.
- Tannehill, I. R. (1947). *Drought, its causes and effects* (Vol. 64): LWW. [doi.org/10.1080/01431161.2021.1875508](https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1875508).
- Vakhshoori, A., Jafar Poor, Z., & Kardavani, P. (2017). Determining the most suitable index for droughts rainfall region in Iran. *Regional Planning*, 7(28), 201-212. (In Persian).
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. [doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1](https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1).
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120. [doi.org/10.1080/02508068508686328](https://doi.org/10.1080/02508068508686328).
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(1), 65-79. [doi.org/10.1002/joc.1371](https://doi.org/10.1002/joc.1371).
- Yao, N., Li, L., Feng, P., Feng, H., Li Liu, D., Liu, Y., ... Li, Y. (2020). Projections of drought characteristics in China based on a standardized precipitation and evapotranspiration index and multiple GCMs. *Science of the Total Environment*, 704, 135245. [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135245](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135245).
- Yevjevich, V., Hall, W., & Salas, J. (1978). *Drought research needs-Proceedings of the Conference on Drought Research Needs, held at Colorado State Univ., Dec 1977*.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333-349. [doi.org/10.1139/a11-013](https://doi.org/10.1139/a11-013).