Integrated Watershed Management, Autumn 2022, 2(3), 1-30 **Article Type: Review**

doi: 10.22034/IWM.2022.559192.1039 **Online ISSN: 2783-4581**

A comprehensive overview on applied drought indicators

Hamzah Saeediyan

Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran
Corresponding author: Hamzah.4900@yahoo.com

(Received: 27 July 2022 Revised: 05 September 2022 Accepted: 30 September 2022)

Extended Abstract

Introduction: One of the most important natural disasters is drought phenomenon. If it lasts longer than a season or a long period, it will have economic, social and environmental effects. Drought has no absolute definition and has a specific definition in each region. Each drought varies in severity, duration and extent. Moreover, Drought can be considered as the equivalent of a dry and unusual period or climate that lasts long enough to create a serious imbalance in the hydrological state of a region. Drought can also be regarded as an inevitable phenomenon, including disasters that cannot be prevented but can be managed and organized. Drought indices are an important tool for monitoring and evaluating drought and establish an accurate relationship between many climatic parameters. The information obtained from the indices can be useful for planners, designers and managers of water resources, which is also confirmed by comparative studies of indices.

Materials and Methods: This study focuses on studies of drought indices and how they function on different time and place scales. In order to conduct this research, the required materials were collected from domestic and foreign sources. In this study, 19 drought indices used in Iran and the world are evaluated, the results of different researchers are investigated, and logical conclusions are made from different researches.

Results and discussion: The results showed that each index can be used in different regions according to its nature and water resources indicators, plant-related indicators and risk indicators of agricultural, economic and social indices. All indicators in turn and in areas compatible with the nature of these indicators can have a good prediction of drought, and these indicators all should not be compared because the results of this comparison will not be appropriate, but they should be selected appropriately according to the study area. Meanwhile, time scale is very important in each of the indicators and should be considered in order to achieve a more reliable result. Another point that was obtained from the results of this study is that most of the indices used in Iran and the world have paid more attention to the severity of drought andless to the duration, extent and frequency of drought, which is one of the weaknesses of existing drought indices in Iran and the world. An index of drought can persist in the world to pay for the severity, duration, frequency and extent of drought simultaneously and accordingly, it can definitely have appropriate predictions.

Conclusion: The results showed that the indices of DI, SPI, PDSI, SPEI, BMDI index are the most widely used drought indices. The results also showed that the weakest drought index is the PNPI index and the strongest indeices of drought are SPEI and BMDI indices. In general, in order to use drought indices, the time and place scale related to those indices should be considered in their use. Since each index of drought has been created under certain conditions, it is suggested that they should not be used in Iran or be used with caution. The overall results of this study suggest that it is better to conduct native statistical models of linear and nonlinear regression according to specific climates of Iran in relation to drought indices according to Iranian meteorological and hydrological data and be introduced multivariate Iranian drought index which definitely has more valuable results.

Keywords: Drought, Index, Climate, Drought extent

Citation: Saeediyan, H. (2022). A comprehensive overview on applied drought indicators. *Integrated Watershed Management*, 2(3), 1-30. doi: 10.22034/iwm.2022.559192.1039

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال دوم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحات (۳۰-۱) نوع مقاله: مروری

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/IWM.2022.559192.1039

مروری جامع بر شاخص‌های کاربردی خشک‌سالی

حمزه سعیدیان

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حافظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

نویسنده مسئول: Hamzah.4900@yahoo.com

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۰۶/۱۴ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۷/۰۸)

چکیده

یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی، پدیده خشک‌سالی است و درصورتی‌که بیش از یک فصل یا یک دوره زمانی بلند، به طول انجامد دارای اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. خشک‌سالی را می‌توان معادل یک دوره یا شرایط آب و هوایی خشک و غیرعادی دانست که به‌اندازه کافی دوام داشته تا عدم تعادل جدی در وضعیت هیدرولوژیکی یک ناحیه ایجاد کند. در این تحقیق ۱۹ شاخص خشک‌سالی موردمطالعه قرارگرفته است. بررسی‌ها نشان داد که هر شاخصی با توجه به ماهیتی که دارد می‌تواند در مناطق مختلف مورداستفاده قرار گیرد و همه شاخص‌ها به‌نوبه خود و در مناطق سازگار با ماهیت این شاخص‌ها می‌توانند پایش مناسبی از خشک‌سالی داشته باشند. شاخص مناسب باید با توجه به منطقه موردمطالعه، شاخص‌های منابع آب، شاخص‌های مربوط به گیاه و شاخص‌های مربوط به ریسک محصولات کشاورزی و اقتصادی و اجتماعی انتخاب شود. طبق بررسی منابع موردمطالعه شاخص‌های دهک‌ها، بارش استانداردشده، شدت خشک‌سالی پالمر، شاخص گیاهی اختلاف نرمال شده، شاخص بارش – تبخیر و تعرق استانداردشده و شاخص بالم و مولی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی می‌باشند. همچنین ضعیف‌ترین شاخص خشک‌سالی موردمطالعه، شاخص درصد نرمال بارش و قوی‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی، شاخص‌های بارش – تبخیر و تعرق استاندارد و شاخص بالم و مولی می‌باشند. پیشنهاد می‌شود که با توجه به اینکه هرکدام از شاخص‌های خشک‌سالی در شرایط خاصی ایجاد شده‌اند یا در ایران مورداستفاده قرار نگیرند و یا اینکه بااحتیاط مورداستفاده قرار گیرند. نتایج کلی تحقیق بیان می‌کند که بهتر است در ارتباط با شاخص‌های خشک‌سالی با توجه به داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی ایران، مدل‌سازی‌های آماری رگرسیونی خطی و غیرخطی بومی با توجه به اقلیم‌های خاص ایران صورت گیرد و شاخص چند متغیره خشک‌سالی ایرانی معرفی شود که قطعاً نتایج ارزشمندتری به دنبال خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: خشک‌سالی، شاخص، اقلیم، وسعت خشک‌سالی

استناد: سعیدیان، ح. (۱۴۰۱). مروری جامع بر شاخص های کاربردی خشکسالی. *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۲(۳)، ۳۰-۱.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابلدسترس است.

مقدمه

خشک‌سالی پدیده‌ای است که برگشت‌پذیر بوده و می‌تواند بخش‌های مختلف زندگی انسان و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهد و بر این اساس مستقیماً به مسئله کمبود آب مرتبط است (Tigkas *et al.*, 2012; Eskandari *et al.*, 2021; Damaneh *et al.*, 2021). خشک‌سالی تقریباً در تمامی اقلیم‌های آب و هوایی روی می‌دهد ولی مشخصه‌های آن در مناطق مختلف متفاوت است. در اغلب منابع خشک‌سالی پدیده‌ای طولانی‌مدت است که گاهی در دوره‌های مرطوب نیز کشیده می‌شود (Wilhite & Glantz, 1985; Savari *et al.*, 2022). تعاریف خشکی و خشک‌سالی با یکدیگر متفاوت هستند. برخلاف خشکی که پدیدهٔ دائمی اقلیمی است، خشک‌سالی در مناطق خشک و مرطوب رخ می‌دهد و حالتی طبیعی و نرمال از اقلیم است (Chow & Kareliotis, 1970). خشک‌سالی برخلاف سایر بلایای طبیعی کمتر منجر به خسارت‌های ساختاری می‌شود، کمک‌رسانی در هنگام وقوع این پدیده در مقایسه با سایر پدیده‌ها مثل سیل پیچیده‌تر و مشکل‌تر است (Tsakiris & Vangelis, 2005). طبیعت درون خشک‌سالی‌ها سبب می‌گردد تا ارزیابی شدت خشک‌سالی و اثرات آن بر اکوسیستم‌های مورد عمل بسیار سخت شود (Wilhite & Glantz, 1985). در راستای ارزیابی خشک‌سالی بایستی این پدیده از حالت کیفی و توصیفی به شکل کمی و عددی درآید. بدین منظور از شاخص‌های خشک‌سالی استفاده می‌شود (Richard & Heim, 2002). ازآنجاکه عوامل بسیاری در به وقوع پیوستن یک خشک‌سالی دخالت دارد، شاخص‌های مختلفی برای پایش خشک‌سالی تعریف‌شده‌اند که هر شاخص تنها یک یا چند پارامتر خشک‌سالی را می‌سنجد. برای پایش خشک‌سالی به‌صورت جامع و فراگیر معمولاً لازم است شاخص‌های مختلفی محاسبه گردد. خشک‌سالی را می‌توان به‌عنوان پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر و ازجمله بلاهایی که امکان پیش‌گیری ندارد اما قابل مدیریت و ساماندهی است نام برد (Smakhtin & Hughes, 2004). شاخص‌های خشک‌سالی ابزار مهمی برای پایش و ارزیابی خشک‌سالی هستند و ارتباط دقیقی بین بسیاری از پارامترهای اقلیمی برقرار می‌کنند. اطلاعات به‌دست‌آمده از شاخص‌ها می‌تواند برای برنامه‌ریزان، طراحان و مدیران منابع آب مفید باشد. مطالعات مقایسه‌ای شاخص‌ها نیز این امر را نشان می‌دهد (Hayes, 2004). اولین نشانه‌های خشک‌سالی در ثبت بارندگی مشاهده می‌شود. همچنین کمبود طولانی‌مدت بارش سبب ورودی کمتر به سیستم هیدرولوژی می‌شود. در طی یک دوره خشک، تبخیر و تعرق پتانسیل می‌تواند افزایش یابد. پس از یک دوره زمانی کوتاه، مقدار ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر این شرایط شروع به کاهش می‌کند درنتیجه تغذیه سیستم آب زیرزمینی کم شده و ممکن است پس از یک سال یا بیشتر از شروع خشک‌سالی، سطح تراز آب چاه‌ها به کمبود بارندگی واکنش نشان دهد (Van Loon, 2013). یکی از مشخصات پدیده خشک‌سالی که آن را از بسیاری پدیده‌های طبیعی دیگر مجزا می‌سازد، زمان شروع و خاتمه آن است که با دقت زیادی قابل پیش‌بینی نیست؛ بنابراین تشخیص واقع‌شدن در یک دوره خشک، پیش‌نیازی برای اعمال تهمیدات مدیریتی در مقابله با این پدیده است که نشانگر ضرورت انجام مطالعات خشکی در قالب بررسی‌های جامع مدیریت خشک‌سالی است. برای ارزیابی کمی و کیفی خشک‌سالی معمولاً از شاخص‌هایی جهت تعیین خشک‌سالی استفاده می‌شود (Panu & Sharma, 2002). تعیین دقیق زمان شروع و خاتمه خشک‌سالی تا حدودی مشکل است. محققان بسیاری برای مطالعه این پدیده از شاخص‌های تک پارامتری بر اساس بارندگی سالیانه یا ۱۲ ماهه ثابت به

دلیل سادگی و قابل‌دسترس بودن داده‌های بارندگی در مناطق مختلف دنیا استفاده می‌کنند (Moreira *et al.*, 2008)؛ اما نتایج تحقیقات جدید بیان می‌کند که تعیین خشک‌سالی بر اساس یک متغیر و یا یک معرف برای توصیف جامع و واقعی ریسک وقوع خشک‌سالی و تصمیم‌سازی ممکن است کافی نباشد (Sough *et al.*, 2016). هدف از تحقیق حاضر مطالعه ۱۹ شاخص خشک‌سالی در دنیا است که برخی از آن‌ها دارای کاربردهای بیشتری به دلیل سادگی و در دسترس بودن متغیرهای آن‌ها هستند. این تحقیق درواقع مجموعه نسبتاً کاملی از شاخص‌های مورداستفاده در دنیا و همچنین معایب و مزیت‌های استفاده از آن‌ها را در اختیار محققان مختلف قرار می‌دهد و درنهایت پرکاربردترین این شاخص‌ها و همچنین کاربردی‌ترین فاکتور مورداستفاده در آن‌ها را بیان می‌کند. از مزیت‌های مهم این تحقیق جامعیت آن در مورد انواع شاخص‌های خشک‌سالی مورداستفاده در ایران و دنیا است.

مواد و روش‌ها

با توجه به زمینه فعالیت‌های محققان رشته‌های مختلف، تعاریف ویژه‌ای از خشک‌سالی ارائه‌شده که درنهایت موجب طبقه‌بندی و تفکیک این پدیده شده است. این امر سبب گردیده است که روش‌های مطالعاتی خاصی با توجه به شاخص‌های موردتوجه همچون بارندگی، رطوبت خاک، جریان‌های سطحی، مخازن زیرزمینی، خسارت‌های اقتصادی ابداع و ارائه گردد که به ۱۹ شاخص خشک‌سالی در این تحقیق اشاره می‌شوند. این پژوهش با تأکید بر مطالعات شاخص‌های خشک‌سالی و چگونگی عملکرد آن‌ها در مقیاس‌ها زمانی و مکانی مختلف انجام‌شده است. برای انجام این پژوهش مطالب موردنیاز از منابع داخلی و خارجی جمع‌آوری شد. در این پژوهش سعی گردیده است ۱۹ شاخص خشک‌سالی مورداستفاده در ایران و دنیا موردبررسی قرار گیرد و نتایج محققان مختلف بررسی و درنهایت از تحقیقات مختلف نتیجه‌گیری منطقی صورت گیرد.

نتایج و بحث

با بررسی‌های به‌عمل‌آمده، ۱۹ شاخص خشک‌سالی مورداستفاده در دنیا به‌دست آمدند و هرکدام از آن‌ها در شرایط خاصی ایجادشده‌اند که اطلاع از آن برای محققان امری ضروری است. انواع شاخص های خشک‌سالی مورداستفاده در دنیا عبارتند از:

۱) شاخص درصد نرمال بارش (PNPI)

این شاخص در سال ۱۹۹۴ توسط ویلکی و همکارانش ارائه شد (Willeke *et al.*, 1994) و مفهوم اساسی آن تقسیم بارش واقعی بر بارش نرمال است و تنها فاکتور موردنیاز جهت محاسبه آن بارش است و همچنین در مقیاس زمانی ماهیانه به‌کاربرده می‌شود. شاخص PN به‌وسیله تقسیم مقدار واقعی بارش بر بارش نرمال و ضرب کردن آن در عدد ۱۰۰ به‌دست می‌آید. بارش نرمال برای هر منطقه ۱۰۰٪ در نظر گرفته می‌شود. این روش یکی از ساده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری شدت خشک‌سالی است و جهت بیان اولیه خشک‌سالی مفید است (رابطه ۱).

$$PNPI = \frac{P}{\overline{P}} * 100 \qquad (۱)$$

که در آن P: بارندگی واقعی $\overline{P}$: مقدار متوسط بارندگی PNPI: شاخص درصد نرمال بارش، این شاخص می‌تواند برای مقیاس‌های زمانی مختلف (ماهانه، فصلی و سالانه) مورداستفاده قرار گیرد (جدول ۱). در مقیاس محلی (برای یک منطقه) و فصلی بسیار مناسب است. استفاده از این شاخص ساده است و مقادیر حاصل از این شاخص قابلیت انعطاف‌پذیری جهت سایر محاسبات را دارد و می‌تواند در توزیع‌های آماری، جهت پیش‌بینی وارد شود. استفاده از این شاخص برای مناطق با فصول متفاوت

موجب اشتباه می‌شود؛ زیرا مقادیر این شاخص در مکان-ها و همچنین دوره‌های زمانی مختلف، معانی متفاوتی دارد. فراوانی وقوع یک پدیده می‌تواند شاخصی از طبیعی بودن آن و میزان سازگاری محیط با آن پدیده باشد. لیکن این مورد در این شاخص در نظر گرفته نشده است. توزیع آماری حاکم بر بارندگی، توزیع نرمال فرض می‌شود که در آن متوسط و میانه بارندگی برابر است، درحالی‌که در طبیعت الزاماً چنین نیست (Hisdal *et al.*, 2005).

جدول ۱- طبقات مختلف شاخص PNPI

Table 1- Different classes of PN index

ردیف	وضعیت خشک‌سالی	عدد شاخص (٪)
1	خشک‌سالی ضعیف	70 تا 80
2	خشک‌سالی متوسط	55 تا 70
3	خشک‌سالی شدید	40 تا 55
4	خشک‌سالی بسیار شدید	کمتر از 40

یکی از اشکالات کاربرد شاخص درصد نرمال بارندگی این است که متوسط بارندگی اغلب با میانه بارندگی، که مقداری متجاوز از ۵۰٪ بارش رخ‌داده در یک دوره اقلیمی بلندمدت است، متفاوت است. علت این مسئله آن است که بارندگی ماهانه یا فصلی از یک توزیع نرمال پیروی نمی‌کند، حال اینکه شاخص درصد نرمال به یک توزیع نرمال دلالت دارد که در آن میانه و میانگین یکسان هستند. شاخص PNPI روشی ناکارآمد برای ارزیابی خشک‌سالی بوده و پیش‌بینی خشک‌سالی با توجه به این شاخص خطاهای زیادی خواهد داشت (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019).

۲) شاخص بارش استاندارد (SPI)

این شاخص در سال ۱۹۹۵ توسط مکی و همکاران ارائه شده است (McKee *et al.*, 1995). برای محاسبه این شاخص از تابع چگالی توزیع گاما و گاهی از تابع پیرسون برای برازش داده‌های بلندمدت استفاده می‌شود که پس از انجام محاسبات لازم و تعیین پارامترهای مربوط به شاخص به‌صورت مثبت و منفی بیان می‌شود. این شاخص را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶،۱۲،۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه نمود. شاخص SPI شاخصی است که بستگی به‌احتمال بارش برای هر زمان و مقیاس است و برای مقیاس های زمانی مختلف می‌تواند محاسبه گردد و می‌تواند هشدار اولیه جهت خشک‌سالی و کمک به ارزیابی شدت آن باشد. این روش به‌وسیله Mckees با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک، کلاهک برفی و جریان آبراهه، ارائه‌شده است. این نمایه جهت کمی کردن کمبود بارش در مقیاس زمانی چندماهه و منعکس‌کننده تأثیرات خشک‌سالی بر روی نوسانات موجود بارش در مقیاس زمانی نسبتاً کوتاه بوده، درعین حال باید توجه داشت که جریان آب های زیرزمینی و ذخایر آب های سطحی منعکس‌کننده نوسانات درازمدت بارش است. به همین دلیل SPI اساساً برای مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه می‌شود. نمایه SPI با تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار بارش به‌دست می‌آید. میانگین SPI در مقیاس زمانی در یک موقعیت صفر خواهد بود و انحراف معیار آن برابر یک است این‌یک مزیت است زیرا SPI نرمال شده است؛ بنابراین اقلیم‌های خشک‌تر و مرطوب‌تر می‌توانند به همان روش نشان داده شوند. علاوه بر دوره‌های خشک‌سالی، دوره‌های ترسالی هم به‌وسیله نمایه SPI بررسی می‌گردد. یک حادثه خشک‌سالی هرزمانی که SPI به‌طور مداوم منفی باشد و شدت آن به ارقام ۱- یا کمتر بر سد، اتفاق می‌افتد، این حادثه زمانی که SPI به مقادیر مثبت برگردد پایان می یابد؛ بنابراین هر حادثه خشک‌سالی دارای یک دوره زمانی است که با شروع و خاتمه آن تعریف و شدت آن برای هرماه تا زمانی که حادثه تداوم دارد محاسبه

می‌شود. مبنای آن سری داده‌های طولانی‌مدت بارندگی است که این سری داده‌ها با توزیع آماری خاصی برازش می‌یابند که در این روش به توزیع نرمال تبدیل می‌شود؛ بنابراین متوسط SPI در یک منطقه به سمت صفر میل می‌کند. لذا مبنای آن توزیع آماری بارندگی در بازه مختلف زمانی است. برای محاسبه این شاخص ابتدا تابع چگالی احتمال گاما به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{a}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \qquad x > 0 \quad (۲)$$

در فرمول فوق $\alpha > ۰$ پارامتر شکل، $\beta > ۰$ پارامتر مقیاس و $X > ۰$ مقدار بارندگی ماهانه و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که به‌صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (۳)$$

$$A = \ln(\overline{X}) - \frac{\sum_{i=1}^{n} lnxi}{n} \quad (۴)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{4A}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right] \quad (۵)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\overline{X}}{\hat{a}} \quad (۶)$$

در فرمول‌های فوق X میانگین بارش طولانی‌مدت و n تعداد مشاهداتی است که بارندگی در آن‌ها روی‌داده است. سپس احتمال تجمعی بارش در مقیاس زمانی موردنظر به‌صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$G(x) = \int_0^x g(x)d(x) = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{a}}\Gamma(\hat{a})}\int_0^x x^{\hat{a}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (۷)$$

ازآنجاکه تابع گاما برای مقادیر بارش برابر صفر تعریف‌نشده است به دلیل وجود مقادیر صفر در داده‌های بارش احتمال تجمعی بارش به‌صورت رابطه (۸)تعریف می‌شود:

$$H(x) = q + (1-q)\,G(x) \quad (۸)$$

که در آن q احتمال وقوع مقادیر صفر است اگر m تعداد صفرها در مقادیر بارش باشد q را می‌توان به‌صورت m/n محاسبه کرد. $H(x)$ شکل تغییریافته نمره Z استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک است که مقادیر SPI را به دست می‌دهد. اگر $H(x)$ بین صفر و کوچک‌تر و مساوی ۰/۵ باشد Z به شکل رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$Z = SPI = -\left[t - \left(c_0 + c_1 t + c_2 t^2 / 1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3\right)\right] \quad (۹)$$

اگر $H(x)$ بین ۰/۵ و کوچک‌تر و مساوی ۱ باشد Z به شکل رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$Z = SPI = +\left[t - \left(c_0 + c_1 t + c_2 t^2 / 1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3\right)\right] \quad (۱۰)$$

مقدار t نیز از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

اگر $H(x)$ بین صفر و کوچک‌تر و مساوی ۰/۵ باشد t به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(H(x))^2}\right]} \quad (۱۱)$$

اگر $H(x)$ بین ۰/۵ و کوچک‌تر و مساوی ۱ باشد t به شکل رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(1-H(x))^2}\right]} \quad (۱۲)$$

مؤلفه‌های d_1، d_2، d_3، C_0، C_1 و C_2 مقادیر ثابت هستند که به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$d_1 = ۱/۴۳۲۷۸۸$, $d_2 = ۰/۱۸۹۲۶۹$, $d_3 = ۰/۰۰۱۳۰۸$,

$c_0 = ۲/۵۱۵۵۱۷$, $c_1 = ۰/۸۰۲۸۵۳$, $c_2 = ۰/۰۱۰۳۲۸$

ساختار این روش قابلیت استفاده از این شاخص برای بازه‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کند. ازآنجاکه شاخص SPI استانداردشده است، برای اقلیم‌های خشک و مرطوب قابل‌استفاده است و روش ساده‌ای است. امکان ارزیابی شدت خشک‌سالی با آن وجود دارد. مقادیر SPI در صورت تفاوت توزیع آماری داده باهم متفاوت‌اند، اما در صورت تغییر طول دوره آماری حتی با برازش داده‌ها با یک توزیع مانند گاما مقادیر محاسباتی دارای اختلاف معنی‌داری می‌شوند (جدول ۲).

جدول۲- طبقه‌بندی مقادیر شاخص SPI

Table 2- Classification of SPI index values

مقادیر SPI	وضعیت آب و هوایی
>2	شدیداً مرطوب
1.99–1.5	خیلی مرطوب
1.49 –1	مرطوب متوسط
0.99 -0	مرطوب ملایم
-0.99 -0	خشک‌سالی ملایم
-1.49 - -1	خشک‌سالی متوسط
-1.99 - -1.5	خشک‌سالی شدید
< -2	خشک‌سالی خیلی شدید

کاربرد توزیع‌های مختلف آماری در مقادیر SPI بسیار مؤثر است، چراکه این روش بر مبنای توزیع آماری داده-های طولانی‌مدت بارندگی طراحی‌شده است. هنگام محاسبه SPI در دوره‌های طولانی و تحلیل‌های منطقه‌ای بهتر، نیاز به وجود داده‌های طولانی‌مدت است که در بسیاری از نقاط جهان از این نظر محدودیت وجود دارد. یکی از محدودیت‌های شاخص بارش استاندارد عدم لحاظ بیلان آب بر اساس میزان تبخیر و تعرق است (Nosrati, 2014). بر اساس نتایج تحقیق (Morid *et al.*, 2006) شاخص بارش استانداردشده می‌تواند آغاز خشک‌سالی را به‌خوبی نشان دهد و در مقیاس زمانی و مکانی کارایی دارد که این می‌تواند از نقاط بالقوه این شاخص باشد. این شاخص به‌طور رایج در کشورهای مختلف مورداستفاده قرارگرفته شده است (Bazrafshan, 2002; Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2010). همچنین کارایی شاخص SPI در اقلیم‌های مختلف ایران مورد تائید قرارگرفته است (Bazrafshan, 2002). Wu و همکاران (۲۰۰۵؛ ۲۰۰۷) نتیجه گرفتند که برای مناطق خشک مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت شاخص بارش استانداردشده بهتر عمل می‌کند چون در این اقلیم‌ها، طول دوره خشک‌سالی بیش از شدت آن اهمیت دارد. شاخص SPI برای توصیف خشک‌سالی متغیر بارش نیاز دارد. تغییرپذیری SPI باعث شده است که در مقیاس‌های کوتاه‌مدت برای کشاورزی و در مقیاس‌های بلندمدت برای اهداف هیدرولوژی استفاده شود به همین علت است که این شاخص پذیرش جهانی دارد (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019). MacKee و همکاران (۱۹۹۳) با مقایسه ضرایب همبستگی بین دو شاخص بارش استاندارد و پالمر به این نتیجه رسیدند که این دو شاخص حداکثر همبستگی را در مقیاس زمانی نزدیک ۱۲ ماهه دارند که در این مقیاس ضریب همبستگی نزدیک به ۰/۹ و کمترین همبستگی مربوط به مقیاس زمانی ۲۴ ماهه است، مطالعات Guttman (۱۹۹۸) با مقایسه دو شاخص SPI و PDSI با استفاده از آنالیزهای طیفی نشان داد خصوصیات طیفی پالمر در سراسر آمریکا از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر متغیر است اما شاخص بارش استاندارد به‌این‌ترتیب نیست و این شاخص یک روش ساده و با تغییر آسان است. شاخص SPI دارای مزیت نسبی بالایی برای پایش خشک‌سالی است (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019). شاخص SPI جهت کمی کردن بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف از ۱ تا ۴۸ ماهه طراحی‌شده است (MacKee *et al.*, 1995). این مقیاس‌ها اثرات خشک‌سالی را بر روی میزان توانایی منابع آب نشان می‌دهند (MacKee et al. 1993; Hayes, 2001). Aaron و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند که شاخص بارش استاندارد نمایش بهتری از تغییرات کوتاه‌مدت و رطوبت خاک ارائه می‌دهد و نیز برای برآورد رطوبت خاک بسیار مناسب است. Hayes و همکاران (۱۹۹۸) بیان کردند که شاخص بارش استاندارد قادر به تشخیص زمان شروع خشک‌سالی و پیشرفت آن است و همچنین یک شاخص مناسب برای هشدار خشک‌سالی است. ضمناً در بررسی Piry و Mobaraki (۲۰۲۱) شاخص SPI خشک‌سالی‌های ضعیف را بهتر از شاخص‌های دیگر نشان داد.

۳) شاخص رطوبت محصول (CMI)

این شاخص در سال ۱۹۶۸ توسط پالمر ابداع شد. مفهوم این شاخص بر اساس میانگین دما و مجموع بارش هر هفته در یک تقسیم اقلیمی نسبت به مقادیر CMI هفته قبل استوار است و با توجه به زمان و مکان دارای ضرایب وزنی است. فاکتورهای اساسی مورداستفاده در این شاخص دما و بارش است و در مقیاس زمانی هفتگی به کار می‌رود. شاخص CMI منعکس‌کننده رطوبت در دوره‌های زمانی کوتاه و در مورد محصولات زراعی عمده است. این روش، خشک‌سالی کشاورزی بالقوه را تعریف

می‌کند. در این روش، از راهبردهای هواشناسی جهت نمایش هفته‌به‌هفته شرایط محصولات زراعی استفاده می‌شود. CMI جهت تغییرات کوتاه‌مدت شرایط رطوبت در مناطق عمده کشت زراعی استفاده می‌شود. CMI همچنین می‌تواند برای زمان‌های بارش در ابتدای فصل رشد یک محصول مورداستفاده قرار گیرد. اساس شاخص CMI بر پایه محاسبات شاخص پالمر بوده و تفاوت اساسی این دو شاخص در این است که شاخص رطوبت محصول نمی‌تواند به بررسی درازمدت شرایط رطوبتی بپردازد و در صورت استفاده از این شاخص برای طولانی‌مدت، اطلاعات به‌دست‌آمده از این شاخص فاقد اعتبار خواهد بود درحالی‌که شاخص پالمر بر اساس محاسبات طولانی خشکی و رطوبت پایه‌گذاری شده است (Zoljudi, 2017). Meyer و Hubbard (۱۹۹۵) نشان دادند شاخص‌های PDSI[1] و CMI[2] برای کاشت ذرت به‌ویژه زمانی که با تنش‌های رطوبتی و گرمایی شدید مواجه می‌شوند فاقد اعتباراست. شاخص CMI محدود به استفاده در فصل رشد بوده و همچنین نمی‌تواند مدت‌زمان طولانی خشک‌سالی را تعیین کند (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019). شاخص رطوبت محصول، شاخص بررسی رطوبت در لایه سطحی خاک در مقیاس زمانی هفتگی است. محاسبه شاخص رطوبت محصول به‌خصوص در کشور ایران که دارای نوسانات رطوبتی بسیاری در طول دوره رشد گیاه است ضروری به نظر می‌رسد اگرچه بسیاری از مؤلفه‌های موجود در این شاخص در کشور وجود ندارد ولی می‌توان به تهیه مؤلفه‌های موردنظر پرداخت و جهت محاسبه شرایط رطوبتی محصول از آن استفاده کرد (Zoljudi, 2017). برای محاسبه CMI اولین گام محاسبه درصد ظرفیت اشباع (M) است این درصد برای سنجش چگونگی اشباع خاک مورداستفاده قرار می‌گیرد. در گام دوم آنومالی تبخیر محاسبه می‌شود:

$$M = (S_S + SU)/AWC \quad (۱۳)$$

$$CET = Alpha * PE \quad (۱۴)$$

سپس $\dot{Y}$ محاسبه می‌شود:

$$\dot{Y}\, i = 0.67 * \dot{Y}\, I\text{-}1 + 1.8\,(DE) \quad (۱۵)$$

اگر $\dot{Y}$ کوچک‌تر از صفر باشد اکنون می‌توانیم Y را نیز محاسبه کنیم:

$$Y = M * \dot{Y} \quad (۱۶)$$

ارزش عددی H به‌وسیله Gi – 1 تعیین می‌شود:
اگر Gi-1= 0 باشد H=0 و اگر Gi-< 0.5 باشد H=Gi-1 و اگر Gi-<1 باشد H=0.5 و H=0.5* Gi-1 است و در مرحله بعد Gi محاسبه می‌شود:

$$Gi = Gi\text{-}1 - h + (M*R) + RO \quad (۱۷)$$

و درنهایت CMI محاسبه می‌شود (یعنی کسری رطوبت + مازاد رطوبت):

$$CMI = Y + G \quad (۱۸)$$

AWC که درواقع ظرفیت موجود نگهداری آب است؛ PE تبخیر بالقوه بوده که بر اساس محاسبات انجام‌شده توسط روش تورنت وایت[3] محاسبه می‌شود؛ ET میزان تبخیر واقعی و Alpha ضریب تبخیر و تعرق است؛ CET بیانگر شرایط آب و هوایی برای ایجاد تبخیر و تعرق است؛ R محاسبه کلی تخلیه و RO محاسبه کلی رواناب؛ **Ss** مقدار رطوبتی سطح بالایی خاک؛ SU مقدار رطوبتی لایه پایینی خاک؛ M درصد ظرفیت اشباع؛ DE نسبت آنومالی تبخیر برای هر هفته؛ Y^1I اولین تخمین برای Y در طول هفته I ام؛ Yi شاخص کسری موازنه تبخیر و تعرق در طول هفته i ام؛ H شرایط برگشت به دوره نرمال رطوبتی و CMI شرایط رطوبتی است (جدول ۳).

1. Palmer Drought Severity Index
2. Crop Moisture Index
3. Thornthwaite

جدول۳- طبقه‌بندی مقادیر شاخص CMI
Table 3- Classification of CMI index values

مقادیر CMI	وضعیت آب و هوایی
< -3	خیلی زیاد خشک
-2 تا-2.9	زیاد خشک
-1 تا -1.9	تقریباً خشک
-0.9 تا0.9	خیلی کم خشک تا کم مرطوب
1تا 1.5	تقریباً مرطوب
2 تا 2.5	مرطوب
> 3	خیلی مرطوب

شاخص رطوبت محصول در مقیاس هفتگی در مقایسه با شاخص‌های دیگر، سریع‌تر به کمبود رطوبت عکس-العمل نشان می‌دهد و همچنین با دخالت دادن پارامتر دما از طریق محاسبه تبخیر و تعرق با دقت و حساسیت بیشتری به پایش خشک‌سالی کشاورزی می‌پردازند (Zoljudi, 2017). تمامی خصوصیات فوق باعث شده که این شاخص به‌عنوان یکی از مؤثرترین شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی در طی فصل رشد شناخته شود (Heim, 2002). به‌طوری‌که نقشه‌های CMI هفتگی در مرکز تخفیف اثرات خشک‌سالی نبراسکا تهیه می‌گردد (Hayes, 2010).

۴) شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI)

شاخص شناسایی خشک سالی برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ میلادی توسط Tsakiris و Vangelis در یونان ارائه شد. با برشمردن برخی از مزیت‌های شاخص بارش استاندارد بیان داشتند که در مناطقی با دمای زیاد و تبخیر و تعرق بالا، بارندگی به‌تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده وقوع خشک سالی باشد. آن‌ها با بهره‌گیری از مفاهیم و ساختار توسعه شاخص بارش استاندارد، از مقادیر نسبت بارش به ET_0، شاخص جدید RDI را برای شدت، مدت و گستره مکانی خشک‌سالی در منطقه مدیترانه ارائه نمودند. شاخص RDI از برازش تابع توزیع لوگ نرمال بر مقادیر نسبت بارش به ET_0 و استاندارد کردن آن به دست می‌آید؛ بنابراین شاخص RDI از دو پارامتر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل برای تعیین خشک‌سالی استفاده می‌کند. پیش‌بینی می‌شود که این شاخص از دقت و اطمینان بیشتری نسبت به شاخص‌هایی که فقط از متغیر بارندگی برای تعیین خشک‌سالی استفاده می‌شود برخوردار باشد. جهت محاسبه این پارامتر، نخست با استفاده از نسبت بارندگی (P) به تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) مقادیر اولیه α_o^i برای هر بازه زمانی دلخواه یا سال‌های مختلف بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_o^i = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{i-j}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{i-j}} \quad (۱۹)$$

$i= 1, 2\ldots, N \quad j= 1, 2\ldots\ldots,12$

در این رابطه بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل ماه j ام از سال i ام و N تعداد سال‌های آماری است. سپس مقادیر RDI نرمال شده یا RDI_n با استفاده از مقادیر α_o^i محاسبه‌شده برای سال‌های مختلف در گام قبلی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RDI_n^i = \frac{\alpha_o^i}{\overline{\alpha_o}} - 1 \quad (۲۰)$$

در این رابطه $\overline{\alpha_o}$ میانگین حسابی مقادیر α_o^i در سال‌های موردبررسی است. سپس در محاسبه این شاخص، مقادیر استانداردشده (RDI_{st}) است که با فرض اینکه α_o^i از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند استفاده از مقادیر α_o^i سال‌های مختلف مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$RDI_s^i = \frac{Yi - \overline{y}}{\tilde{o}y} \quad (۲۱)$$

در این رابطه y_i برابر است با $Ln\ \alpha_o^i$ و $\bar{Y}$ و $\tilde{o}\ y$ به ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر y_i است. طبقه-بندی شدت خشک‌سالی در جدول ۴ آمده است (Tsakiris *et al.*, 2007):

جدول۴- طبقه‌بندی مقادیر شاخص RDI
Table 4- Classification of RDI Index Value

مقادیر RDI	وضعیت آب و هوایی (طبقه)
> 2	ترسالی خیلی شدید
1.99-1.5	ترسالی شدید
1.49- 1	ترسالی متوسط
0.99--0.99	نرمال
-1--1.49	خشک‌سالی متوسط
-1.5- -1.99	خشک‌سالی شدید
< -2	خشک‌سالی خیلی شدید

Tsakiris و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که گرچه عموماً پاسخ شاخص RDI مشابه شاخص SPI است، ولی شاخص RDI حساس به تغییرات محیطی است و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. Bazrafshan و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که همبستگی زیادی بین دو شاخص SPI- RDI در سواحل جنوبی و شمالی ایران وجود دارد و کاربرد آن‌ها جهت ارزیابی و پایش خشک‌سالی است. Tigkas و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از دو شاخص RDI و SDI به بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی بر خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه پرداختند. نتایج نشان می‌دهد، بیشترین همبستگی بین RDI-9 ماهه و SDI-12 ماهه بوده است. شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI) بامنظور نمودن تبخیر و تعرق نتایج بهتری در ارتباط با تأثیر خشک‌سالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد (Sough *et al.*, 2016). شاخص RDI با شاخص SWSI شباهت دارد و تابع‌های عرضه، تقاضا و مدت‌زمان را ترکیب می‌کند و همچنین ویژگی‌های دما و مدت‌زمان را نیز در شاخص ترکیب می‌کند (Miryaghoubzadeh *et al.* 2019). اخیراً از شاخص شناسایی خشک‌سالی استقبال وسیعی شده است و به‌طور عمده در مناطق خشک و نیمه‌خشک آب و هوایی به کار گرفته می‌شود (Torabi Tabatabai & Shamsnia, 2019). Khalili و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که شاخص RDI می‌تواند نسبت به تغییرات اقلیمی حساس‌تر باشد. این مسئله درباره بررسی خشک‌سالی‌های کشاورزی اهمیت زیادی داشته و به نظر می‌رسد برای این هدف بهتر باشد. ازآنجایی‌که شاخص RDI بر اساس بارش و تبخیر- تعرق بوده و تبخیر – تعرق نقش مهمی در تلفات آب دارد می‌تواند در نظارت بر خشک‌سالی در ایران باارزش باشد (Asadi Zarch *et al.*, 2011). ضمناً این شاخص می‌تواند با در نظر گرفتن مقیاس‌های مختلف زمانی و به‌صورت سالانه وضعیت خشک‌سالی را پایش کند (Torabi Tabatabai & Shamsnia, 2019). این شاخص توسط Tsakiris و Vangelis (۲۰۰۴) معرفی‌شده که به دلیل نیاز به داده‌های کم، حساسیت بالا و انعطاف‌پذیری زیاد کاربرد آن در حال افزایش است. این شاخص همانند شاخص بارش استاندارد برای بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت یعنی ۱ تا چندماهه و بازه‌های زمانی بلندمدت یعنی ۲۴ و حتی ۴۸ ماهه کاربرد داشته و انعطاف‌پذیر است. شاخص RDI مقایسه منطقی از شرایط خشک‌سالی را در مناطق با آب‌وهوای متفاوت نشان می‌دهد (Elagib & Elhag, 2011)؛ بنابراین شاخص RDI توانایی بالایی در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت خشک‌سالی دارد و می‌تواند در مدیریت منابع آب مفید باشد (Moghimi *et al.*, 2020).

۵) شاخص تجمیعی خشک‌سالی (ADI)

استفاده از روش PCA برای کاهش حجم داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی و برای استخراج شاخص‌های خشک‌سالی نخستین بار توسط Keyantash و Dracup (۲۰۰۴) با معرفی شاخص تجمعی خشک‌سالی (ADI) آغازشده است. آن‌ها شاخص تجمعی خشک‌سالی را از ترکیب پارامترهای مؤثر بر خشک‌سالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی توسعه و به‌منظور پایش جامع خشک‌سالی بیان کردند (Sough *et al.*, 2017). یکی از نخستین تلاش‌ها برای پایش جامع خشک‌سالی در

ایالات‌متحده انجام‌شده است که در آن اطلاعات به‌دست‌آمده از منابع مختلف شامل داده‌های اندازه‌گیری شده، سنجش‌ازدور، شبیه‌سازی‌های سطح زمین و کارشناسان محلی باهم ترکیب‌شده‌اند (Ivakumar *et al.*, 2011). شاخص چندمتغیره خشک‌سالی تجمعی از ترکیب پارامترهای مؤثر بر خشک‌سالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی توسعه داده شد (Keyantash & Dracup, 2004).

$$ADI = \sum DI/(3nN) \quad (۲۲)$$

DI بر اساس رابطه بین بارش و تبخیر و تعرق تعیین‌شده و n برابر تعداد دوره‌های زمانی و N برابر تعداد دوره‌هایی که مقدار بارش کمتر از ۱۰ میلی‌متر است. شاخص ADI به‌عنوان یک شاخص جامع می‌تواند اثرات شاخص‌های خشک‌سالی ورودی نظیر رطوبت را منعکس و پایش جامع‌تری را در اختیار قرار دهد (Sough *et al.*, 2017). ساختار ADI روشی واضح برای توصیف شدت خشک‌سالی ارائه می‌نماید.

۶) شاخص دهک‌ها[1]

این شاخص در سال ۱۹۶۷ توسط Maher و Gibbs ارائه‌شده است. این شاخص اساساً از تقسیم توزیع احتمال وقوع آمار ثبت‌شده درازمدت بارش بر بخشی از هر یک از ده درصد توزیع به دست می‌آید. تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص بارش بوده و مقیاس زمانی مورداستفاده در این شاخص نیز مقیاس ماهیانه است. شاخص دهک‌ها جهت جلوگیری از مشکلات به‌کارگیری روش درصد از نرمال ابداع‌شده است. این شاخص از تقسیم توزیع احتمال وقوع درباره آمار ثبت‌شده درازمدت بارش بر بخشی از هر یک از ده درصد توزیع به دست می آید. هر یک از مقوله‌ها به نام دهک نامیده می‌شود. اولین دهک از بارش به وقوع پیوسته از حداقل ۱۰٪ بارش به وقوع پیوسته تجاوز نمی‌کند. اصول کلی محاسبه شاخص دهک‌ها به این صورت است که ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه و یا سالانه به‌صورت صعودی مرتب می‌شوند سپس احتمال وقوع بارش از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$Pi = (i/N+1) * 100 \quad (۲۳)$$

که در آن Pi احتمال وقوع بارندگی در شماره ردیف P ام و تعداد داده‌های بارندگی است. در ادامه برحسب اینکه یک مقدار در چه فاصله دهکی قرارگرفته باشد، مطابق جدول ۵ یکی از درجه‌های خشک‌سالی به آن نسبت داده می‌شود.

جدول ۵- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص دهک‌ها
Table 5- Classification of drought severity based on decile index

مقدار درصد وقوع	وضعیت خشک‌سالی	شماره دهک
کمتر از 10	خشک‌سالی خیلی شدید	اول
10 تا 20	خشک‌سالی شدید	دوم
20 تا 30	خشک‌سالی	سوم
30 تا 40	تقریباً نرمال	چهارم
40 تا 50	نرمال	پنجم
50 تا 60	کمی نرمال	ششم
60 تا70	کمی مرطوب	هفتم
70 تا 80	مرطوب	هشتم
80 تا 90	بسیار مرطوب	نهم
بیشتر از 90	فوق‌العاده مرطوب	دهم

بنابراین اولین دهک مقدار بارندگی است که از کمترین ده‌درصدی تجاوز نمی‌کند. دومین دهک مقدار بارندگی است که از کمترین ۲۰ درصد کل تجاوز نکرده و به همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند. دهک پنجم یا میانه مقدار بارشی است که از ۵۰ درصد رخدادها تجاوز نمی‌کند. نقص اساسی شاخص دهک‌ها این است که به داده‌های طولانی‌مدت (حداقل سی‌ساله) برای محاسبه نیاز دارد بنابراین برای مکان‌هایی که ایستگاه باران‌سنجی به‌تازگی نصب‌شده است کارایی ندارد (Miryaghoubzadeh *et*

1. Deciles Index

Smith (۲۰۰۰) بیان کرد که روش دهک‌ها (*al.*, 2019). ازنظر محاسبه ساده بوده و به داده‌ها و فرضیات کمتری نسبت به شاخص شدت خشک‌سالی پالمر نیاز دارد. شاخص دهک نوسان‌هایی اگرچه هماهنگ و همسو با سایر شاخص‌ها دارد اما با سرعت بیشتر و اغراق‌آمیزتر در نمودارهای بارش ماهانه و سالانه نشان می‌دهد (Ensafee Moqaddam, 2007). شاخص دهک‌های بارش دارای حساسیت زیادی نسبت به رخدادهای بارش در یک سال است (Morid *et al*., 2006).

۷) شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI)[1]

شاخص PDSI در سال ۱۹۶۵ به‌وسیله پالمر ارائه‌شده و اولین نمایه جامع خشک‌سالی است که در ایالات‌متحده به کار گرفته‌شده است (Smakhtin & Hughes, 2004). در این سال، پالمر شاخ صی را برای اندازه‌گیری میزان انحراف منابع رطوبت ابداع نمود. این نمایه بر اســـاس مفهوم تولید و تقاضـای بیلان آب اسـتوار اسـت. PDSI یک نمایه هواشناسی است و به شرایط هواشناسی پاسخ می‌دهد که به‌طور غیرطبیعی خ شک یا مرطوب با شند. میزان PDSI بر اســـاس داده‌های بارش، دما و همچنین محتوی آب قابل‌دســـترس (AWC)[2] خاک محاســـبه می‌شـــود. میزان ن‌ما یه پالمر بین ۶- و ۶+ اســـت. مطلوب‌ترین روش ترکیبی متغیر های بارش و در جه حرارت روش پالمر اســـت. ضـــریب پالمر به این دلیل جهانی است که درجه حرارت و بارندگی به‌صورت نرمال در تمام ف صول و هرگونه اقلیم به‌طور ثابت عدد صفر را نشـــان می‌دهـد. بعلاوه در دوره‌هـای طولانی‌مـدت، شدیدترین خشک‌سالی غیرمعمول ضریبی در حدود ۶- به دســـت می‌آید بدون اینکه درجه خشـــکی یا مرطوب بودن وضعیت اقلیمی منطقه‌ای که موردمطالعه است در آن نقشی دا شته با شد. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز دوره طولانی یک سری از مقادیر ضرایب خشک‌سالی ماهیانه نشـــان می‌دهد که کلاً این مقادیر بین ۶+ و ۶ - تغییر می‌کنند (جدول ۶).

جدول ۶- شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص پالمر

Table 6- Severity of Drought Based on Palmer Index

عدد شاخص	وضعیت هوا
4 یا بیشتر	بسیار مرطوب‌تر از نرمال
3 تا 3.99	خیلی مرطوب‌تر از نرمال
2 تا 2.99	نسبتاً مرطوب‌تر از نرمال
1تا 1.99	کمی مرطوب‌تر از نرمال
0.5 تا 0.99	یک حوضه مرطوب در حال شکل‌گیری
0.49 تا 0.49-	تقریباً نرمال
0.5- تا 0.99-	ابتدای خشک‌سالی
1- تا 1.99-	خشک‌سالی ملایم
2- تا 2.99-	خشک‌سالی متوسط
3- تا 3.99-	خشک‌سالی شدید
4- و کمتر	خشک‌سالی بسیار شدید

احتمال وقوع ضـــرایب مثبت همیشـــه وجود دارد ولی مقادیر مثبت غیرمعمول یک دوره طولانی هوای مرطوب غیر نر مال را نشـــان می‌د هد، در تجز یه‌وتحل یل آ مار هوا شنا سی به روش پالمر اطلاعات هوا شنا سی به چند دوره خشـک‌سـالی، مرطوب غیر نرمال، نرمال یا نزدیک نرمال، تقسـیم می‌شـود. روش پالمر به‌طور گسـترده در آمریکا و بعضی دیگر از نقاط جهان استفاده می‌شود. این روش ازنظر محاسبات ریاضی ساده ولی طولانی و زمان‌بر ا ست. اگر محا سبات به صورت د ستی انجام شود زمان زیادی صـرف شـده و کار به‌آرامی پیش می‌رود ولی در صورت دسترسی به کامپیوتر محاسبات بسیار سریع‌تر و با هزینه کم‌تر انجام می‌گیرد. روش پالمر در اکثر موارد برای تجزیه‌وتحلیل‌های اقلیمی مناســـب اســـت و در عملیـات مزرعـه کمتر مورداســـتفـاده قرار می‌گیرد.

1. Palmer Drought Severity Index's
2. Available Water Capacity

باوجوداین در طول دوره‌ای که یک خشک‌سالی بزرگ در حال وقوع و گسترش است این ضریب روش خوبی برای ارزیابی روزانه توزیع منطقه‌ای خشک‌سالی و درجات گوناگون شدت خشکی است. در آمریکا این ارزیابی به‌صورت هفتگی در وضعیت های بحرانی خشک‌سالی انجام می‌گیرد. نمایه پالمر یکی از روش‌های بسیار مؤثر در تعیین خشک‌سالی طولانی مدت (چند ماهه) بوده ولی به‌عنوان پیش‌بینی کوتاه مدت جواب مناسبی نمی‌دهد (مثلاً چند هفته). مزیت دیگر نمایه پالمر آن است که نسبت به شرایط اقلیم محلی استاندارد است؛ بنابراین می‌تواند در هر بخش از کشور جهت نشان دادن خشک‌سالی نسبی یا ترسالی مورداستفاده قرار گیرد. شاخص پالمر بر مبنای بارندگی، درجه حرارت و محاسبه تأمین و تقاضای رطوبت خاک در دولایه از خاک مدل‌سازی شده است. جهت محاسبه این شاخص تمام قسمت‌های اصلی معادلات بیلان آب شامل تبخیر و تعرق، جذب خاک، رواناب و رطوبت کم شده از لایه سطحی، به کار می‌رود. شاخص پالمر یک شاخص تحلیل منطقه‌ای برای خشک سالی کشاورزی است، ولی برای خشک سالی هواشناسی نیز بکار رفته است. این شاخص برای بررسی وسعت و شدت خشک سالی از جنبه‌های مختلف، بررسی خصوصیات مکانی و زمانی خشک سالی، تشریح رفتارهای دورهای خشک‌سالی، روند تغییرات هیدرولوژیک، پیش‌بینی محصول و ارزیابی پتانسیل شدت آتش سوزی، بررسی خشک‌سالی در مناطق وسیع جغرافیایی، پیش‌بینی خشک‌سالی، گردآوری داده‌های بارندگی، دما و تبخیر تعرق پتانسیل ماهانه در سالی که جهت خشک سالی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد به کار گرفته‌شده است (Palmer, 1965). بررسی رطوبت موجود در خاک در اعماق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری و در صورت لزوم در اعماق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری، بر مبنای اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی در سال مورد ارزیابی، محاسبه مقادیر ماهانه ظرفیت زراعی خاک و نقطه پژمردگی خاک در شرایط آزمایشگاهی به‌منظور مقایسه شدت مقدار رطوبت با این پارامترها، بررسی ماهانه رطوبت اولیه خاک و متوسط رواناب پتانسیل ماهانه، محاسبه میزان رطوبت دریافتی در لایه‌های سطحی و زیرین خاک و متوسط افزایش رطوبت ماهانه، محاسبه پتانسیل تجدید رطوبت یا همان مقدار رطوبت موردنیاز برای رسیدن به ظرفیت مزرعه در انتهای هرماه و متوسط ماهانه آن در طول سال، محاسبه میزان کاهش رطوبت ماهانه یا اتلاف رطوبت ماهانه از لایه سطحی و زیرین خاک و متوسط ماهانه آن در طول سال، برآورد مقدار رطوبت ماهانه موردنیاز جهت رسیدن به نقطه پژمردگی مزرعه در ابتدای هرماه و متوسط میزان پتانسیل کاهش رطوبتی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Palmer, 1965). شاخص شدت خشک‌سالی پالمر برای هرماه به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود بدین ترتیب که در یک سری زمانی ماه‌هایی که به‌طور غیرطبیعی خشک بوده‌اند، خشک‌سالی تدریجی را که شدت آن در حال افزایش است، به وجود می‌آورند و شاخص خشک سالی نهایی (X) به‌توالی ارزش‌های (Z) طبق رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$X_i = X_{i-1} + \frac{Z_i}{3} - 0.103\, X_{i-1} \qquad (۲۴)$$

برف و پوشش برفی و زمین یخزده در این شاخص لحاظ نشده است و تمام بارش تحت عنوان باران در نظر گرفته‌شده است؛ بنابراین زمان‌بندی این شاخص، در مناطقی که بارش به‌صورت برف است، برای فصول بهار و زمستان ممکن است درست نباشد؛ لذا برای مناطق کوهستانی شاخص مناسبی نیست. تأخیر طبیعی میان بارش و رواناب به‌دست‌آمده در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این تا زمانی که ظرفیت آب لایه‌های سطحی و

زیرسطحی پر نشده، هیچ روانابی در مدل تولید نمی‌شود، که این منجر به کم برآورد شدن رواناب می‌گردد. شاخص پالمر برای کشاورزی طراحی‌شده است و تأثیرات هیدرولوژیک به‌دست‌آمده از خشک‌سالی‌های بلندمدت را نشان نمی‌دهد. این روش برای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مناسب نبوده و بخصوص نمی‌توان میزان آب معادل برف را در محاسبات وارد نمود. این شاخص تأثیرات انسانی بر بیلان آب را در نظر نگرفته است. ناهنجاری در روند تغییرات بارندگی سبب تغییر در شاخص بخصوص در فصول سرد که تبخیر و تعرق در حداقل مقدار خود قرار دارند می‌شود. این شاخص به‌شدت نسبت به ناهنجاری-های مکانی و زمانی پارامترهای بارندگی و درجه حرارت حساس بوده، بخصوص زمانی که این دو پارامتر هم‌زمان دچار اختلال می‌گردند. شاخص PDSI یک روش ساده برای تعیین خشک‌سالی است. در این شاخص متوسط یا میانگین بارش با میانه برابر نبوده و ارزش آن از ۵۰ درصد بارش اتفاق افتاده انحراف دارد که از معایب این شاخص محسوب می‌شود (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019). شاخص PDSI از مدل ساده‌شده تبخیر پتانسیل تورنت وایت بهره می‌برد که یکی از محدودیت‌های آن عدم وجود تبخیر در دمای کمتر از صفر درجه است. همچنین این مدل اثر بسیاری از عوامل مانند سرعت باد، پوشش گیاهی، کمبود فشار بخار و نوع خاک را در تبخیر در نظر نمی‌گیرد (Xu *et al.*, 2012) و تنها به تغییرات دما واکنش نشان می‌دهد که باعث شده است به‌طور نادرستی به گرمایش جهانی دهه‌های اخیر واکنش نشان دهد (Yan *et al.*, 2013). در ایران این شاخص برای توسعه سیستم‌های پایش خشک‌سالی (karamouz *et al.*, 2013)، بررسی مشخصه‌های مکانی و زمانی خشک‌سالی (Zoljoodi & Didevarasl, 2013)، ارزیابی آسیب‌پذیری از خشک‌سالی (Babaei *et al.*, 2013)، اثرات خشک‌سالی بر هیدرولوژی و کشاورزی (Karamouz *et al.*, 2004) و همچنین پیش‌بینی خشک‌سالی (Karamouz *et al.*, 2009) و (Arshad *et al.*, 2013) استفاده‌شده است. شاخص PDSI اولین شاخص خشک‌سالی جامع در ایالات‌متحده آمریکا بوده که به‌عنوان یک شاخص خشک‌سالی هواشناسی مطرح شد. شاخص PDSI یک خروجی مناسب از عرضه نرمال رطوبت فراهم می‌کند (Jakson *et al.*, 1997). هم‌چنین Felch و Rosenberg (۱۹۷۸) شاخص PDSI را به‌عنوان یک ابزار ارزیابی کمی حوادث خشک‌سالی معرفی نموده‌اند. از نقاط قوت شاخص PDSI این است که نیازمند به متغیرهای ورودی کم و همچنین در نظر گرفتن همه مؤلفه‌های ترازمندی آب در محاسبات شاخص و قابلیت مقایسه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف است (Hijabi *et al.*, 2018).

۸) شاخص ذخیره آب سطحی[1]

این شاخص توسط Shafer و Dezman (۱۹۸۲) ارائه شد و مفهوم اصلی آن همان مفهوم شاخص پالمر است با این تفاوت که در این شاخص ذخیره آب موجود در برف موردتوجه و تأکید قرارگرفته شده است. این شاخص نیز برای مقیاس زمانی ماهیانه به کار می‌رود و فاکتورهای اساسی هواشناسی و اقلیمی مورداستفاده آن بارش و پوشش برف است. شاخص ذخیره آب سطحی توسط Shafer و Dezman در اوایل دهه هشتاد به‌منظور تکمیل فهرست پالمر برای شرایط رطوبتی اراضی ایالت کلرادو تهیه‌شده است. این پارامتر به‌عنوان شاخصی برای شرایط آب‌های سطحی طراحی‌شده و ازآنجاکه مقدار برف کوهستان‌ها در آن، مؤلفه‌ی مهمی محسوب می‌گردد، به‌عنوان شاخص وابسته به کوهستان توصیف‌شده است. در شاخص تأمین آب سطحی چهار مؤلفه هیدرولوژیک به‌کاربرده شده عبارت‌اند از ۱- پوشش برفی ۲- بارش ۳-

1. Surface Water Supply Index

جریان رود ۴- ذخیره رطوبت خاک. رابطه (۲۵) شاخص ذخیره آب سطحی را نشان می‌دهد.

$$SWSI = ((aP_{snow} + bP_{prec} + cP_{strm} + dP_{resv} - 50) / 12) \quad (۲۵)$$

که در آن: a،b،c،d وزن هر یک از مؤلفه‌های هیدرولوژیک؛ Pi= احتمال عدم وقوع (٪) برای مؤلفه i؛ Snow: پوشش برف؛ Prec: بارش؛ Strm: جریان رود؛ Resv: ذخیره رطوبت خاک. دامنه تغییرات این شاخص از ۴/۲- تا ۴/۲+ است و محاسبه این شاخص برای هر حوضه با توجه به خصوصیات آن حوضه صورت می‌گیرد. شاخص SWSI برای تجزیه‌وتحلیل فرکانس جهت به‌کارگیری داده‌های بلندمدت بارش، برف، جریان و سطح مخزن مورداستفاده قرار می‌گیرد (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019).

جدول ۷- طبقه‌بندی شاخص ذخیره آب سطحی
Table 7- Classification of surface water storage index

تغییرات رطوبت	عدد معرف شاخص (SWSI)
مرطوب بسیار شدید	بالای 4
مرطوب شدید	3 تا 4
مرطوب متوسط	2 تا2.99
مرطوب ضعیف	1 تا 1.99
نزدیک نرمال	0.99-تا 0.99+
خشک‌سالی ضعیف	1.99- تا -1
خشک‌سالی متوسط	2.99- تا -2
خشک‌سالی شدید	3- تا -4
خشک‌سالی بسیار شدید	بالای 4-

۹) شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI)

در محاسبه شاخص کمبود رطوبت خاک، آب قابل دسترس روزانه در ناحیه ریشه دوانی در دوره‌های زمانی یک هفتگی در طول سال میانگین‌گیری می‌شود. برای این منظور رطوبت خاک در یک دوره طولانی‌مدت (۷۰ تا ۳۰ ساله)، به‌طور هفتگی در هرسال اندازه‌گیری و میانه آب قابل‌دسترس خاک برآورد می‌گردد. مقادیر میانه به علت پایدارتر بودن و اینکه کمتر تحت تأثیر عوامل دیگر است، نسبت به میانگین مقدار نرمال آب قبل دسترس خاک را بهتر نشان می‌دهد. این شاخص در سال ۱۹۹۴ توسط Hollinyer و همکاران ارائه‌شده است. این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به‌طور روزانه برای یک سال استوار و تنها فاکتور اقلیمی مورداستفاده در این شاخص رطوبت خاک است. این شاخص در مقیاس‌های سالانه به کار می‌رود. این داده‌ها به کمک مدل شبیه‌ساز رطوبت برای دوره پایه محاسبه‌شده و شاخص کمبود رطوبت خاک از طریق روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه می‌شوند (Narasimhan & Srinivasan, 2005).

$$SD_{i,j} = ((SW_{i,j} - MSW_j) / MSW_j - minSW_j) * 100) \quad (۲۶)$$
$$\text{if} \quad Sw_{i,j} \le MSW_j$$

$$SD_{i,j} = ((SW_{i,j} - MSW_j) / maxSW_j - MSW_j) * 100) \quad (۲۷)$$
$$\text{if} \quad Sw_{i,j} > MSW_j$$

در این روابط $SD_{i,j}$ درصد کمبود رطوبت خاک؛ $SW_{i,j}$ میانگین رطوبت خاک در هفته در پروفیل خاک (عمق موردبررسی)؛ MSW_j متوسط درازمدت رطوبت قابل‌استفاده در پروفیل خاک؛ max SW_j حداکثر درازمدت رطوبت قابل‌استفاده در پروفیل خاک؛ min SW_j حداقل درازمدت رطوبت قابل‌استفاده خاک در پروفیل خاک؛ i نشان‌دهنده تعداد هفته‌ها؛ j نشان‌دهنده تعداد سال‌ها است.

$$SMDI_j = \frac{\sum_{t=1}^{j} SD_t}{25t+25} \quad (۲۸)$$

که در آن SD: درصد کمبود رطوبتی خاک. t: زمان (هفته)، مقدار SD طی یک هفته می‌تواند از ۱۰۰- (خیلی خشک) تا ۱۰۰+ (خیلی مرطوب) تغییر می‌کند. در ۱۰۰ خاک مرطوب‌ترین و در ۱۰۰- خاک خشک‌ترین وضعیت را دارا است (Salehi Tabas *et al.*, 2020). شاخص SMDI علاوه بر شرایط حاضر رطوبت خاک به شرایط پیشین نیز توجه دارد (Ramezani Etedali *et al.*, 2012).

۱۰) شاخص نابهنجاری یا بی‌نظمی بارش[1]

این شاخص در سال ۱۹۶۵ توسط Van Rooy عرضه شد. این شاخص بر اساس محاسبه بارش مقایسه شده با ارقام تصادفی از ۳- تا ۳+ به دست می‌آید به‌طوری‌که به بی‌نظمی‌های بارش ۱۰ کرانه اختصاص داده‌شده است. تنها عامل مؤثر در محاسبه این شاخص، بارش است. در ضمن این شاخص در دو مقیاس زمانی ماهانه و سالانه بکار برده می‌شود. اساس شاخص روش ناهنجاری بارندگی، محاسبه انحراف میزان بارندگی از مقدار نرمال است. مراحل محاسبه این شاخص به‌صورت زیر است: ۱- محاسبه میانگین درازمدت بارندگی در ایستگاه‌های موردنظر؛ ۲- استخراج میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده در دوره‌های مطالعاتی (m)؛ ۳- استخراج میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده در دوره مطالعاتی (x)؛ ۴- مقایسه داده‌های بارندگی p یا میانگین درازمدت بارندگی؛ چنانچه $p> \overline{P}$ یا ناهنجاری مثبت باشد، شاخص ناهنجاری بارندگی از رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود:

$$RAI = 3\ ((P-\overline{P}) / (\overline{m} - \overline{P})) \qquad (۲۹)$$

چنانچه $p<\overline{P}$ یا ناهنجاری منفی باشد، شاخص ناهنجاری بارندگی از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود:

$$RAI = -3\ ((P-\overline{P}) / (\overline{x} - \overline{P})) \qquad (۳۰)$$

۵- نسبت داده آستانه‌های ۳+ و ۳- به ترتیب به میانگین ده مورد از شدیدترین ناهنجاری‌های مثبت و منفی به‌دست‌آمده از شاخص ناهنجاری بارندگی؛ ۶- با مقیاس-گذاری روی مقادیر حاصل از شاخص ناهنجاری بارندگی، طبقه‌های مختلف ناهنجاری‌ها تعیین می‌شود. طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص RAI در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸- طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص RAI
Table 8- Classification of drought based on RAI index

وضعیت خشک‌سالی	آستانه‌های نسبت داده‌شده
نزدیک نرمال	0.3- تا0.3+
خشک‌سالی ضعیف	1.2- تا 0.3-
خشک‌سالی متوسط	2.1- تا 1.2-
خشک‌سالی شدید	3- تا2.1-
خشک‌سالی بسیار شدید	کمتر از 3-

شاخص RAI قادر است خشک‌سالی را در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت (۱ تا ۴۸ ماهه) پایش نماید با توجه به نیاز داده‌های محدود برای استفاده از این شاخص، کاربرد آن در حال افزایش است (Miryaghoubzadeh *et al.*, 2019). ضمناً شاخص خشک‌سالی RAI برای بیان خشک‌سالی هواشناسی مناسب‌تر از شاخص‌های مشابه است (Piry *et al.*, 2013). شاخص RAI به همراه شاخص‌های SPEI و SIAP خشک‌سالی‌های شدید و بسیار شدید را بهتر نشان می‌دهند (Piry & Mobaraki, 2021).

۱۱) شاخص بارش مؤثر[2]

این شاخص در سال ۱۹۹۹ توسط بین Byun و Wilhit به‌عنوان جدیدترین شاخص خشک‌سالی در سال‌های اخیر ارائه و بر اساس تحلیل‌های کمی از بارش مؤثر روزانه استوار است؛ بنابراین تنها عامل مؤثر در آن بارش بوده و مقیاس زمانی آن روزانه بوده که دوره چندروزه برای واکنش‌های کوتاه‌مدت تا چندین روزه برای واکنش‌های بلندمدت هیدرولوژیک است. علاوه برشدت، نمایانگر طول دوره و زمان شروع و خاتمه خشک‌سالی نیز بوده، در مناطق دشت مورد آزمایش قرارگرفته و نتایج کنترل‌شده است. شاخص بارش مؤثر جدیدترین شاخص بررسی و ارزیابی خشک‌سالی است که در سال‌های اخیر به‌منظور بهبود کنترل خشک‌سالی و حل مسائل و نقاط

1. Rain fall anomaly index

2. Effective Rain Fall Index

ضعف متداول در شاخص‌هایی که تاکنون بررسی‌شده، برنامه‌ریزی و طراحی‌شده است. بدین ترتیب به‌منظور بررسی روزانه و دقیق خشک‌سالی و حل مشکلات ناشی از آن، شاخص‌های خشک‌سالی برای اولین بار و در سال ۱۹۹۹، مفهوم جدیدی تحت عنوان شاخص بارش مؤثر (EPI) توسط دو تن از محققین به نام‌های Byun و Wilhit ارائه‌شده است. با استفاده از این شاخص می‌توان وضعیت خشک‌سالی را برای هر دوره‌ی دلخواه (با توجه به تعریفی که از خشک‌سالی در ناحیه موردمطالعه می‌شود) بررسی کرد و وقوع خشک‌سالی را در منابع آب‌وخاک نشان داده است. شاخص بارندگی مؤثر از رابطه (۳۱) به دست می‌آید:

$$EP_{i+j-1} = (A_{i+j-1} + M_{i+j-1}) / SD_{i+j-1} \quad (۳۱)$$

EP_{i+j-1}: نمایه بارش مؤثر در دوره تجمیع واقعی؛ A_{i+j-1}: منابع آب قابل‌دسترس طی دوره تجمیع واقعی؛ M_{i+j-1}: میانگین آب قابل‌دسترس در شماره روز معینی از سال؛ SD_{i+j-1}: انحراف استاندارد منابع آب قابل‌دسترس در شماره روز معینی از سال و i+j-1 دوره تجمیع واقعی است.

جدول ۹- طبقات مختلف نمایه بارش مؤثر EPI

Table 9- Different categories of EPI effective precipitation index

طبقات شدت خشک‌سالی	نمایه بارش مؤثر
نرمال	0.7- تا0.7+
خشک‌سالی متوسط	0.7+ تا 1.5
خشک‌سالی شدید	1.5 تا 2.5
خشک‌سالی بسیار شدید	کمتر از 2.5

۱۲) شاخص خشک‌سالی مؤثر[1]

مزیت اصلی شاخص خشک‌سالی مؤثر نسبت به سایر شاخص‌های خشک‌سالی شناخته‌شده این است که این شاخص از مقیاس زمانی روزانه برخوردار است. مبنای این شاخص، بارندگی لازم برای بازگشت به حالت نرمال است. داده‌های این شاخص برای طبقه‌بندی استاندارد می‌شوند. تنها داده موردنیاز این روش، داده‌های بارندگی است. مراحل محاسباتی این شاخص با انتخاب دوره فرضی کمبود آب آغاز و با ادامه عملیات دوره واقعی آن تعیین می‌گردد. مقصود از دوره فرضی در نظر گرفتن یک دوره کمبود بارش فرضی قبل از شروع دوره آماری است. این دوره فرضی می‌تواند ۳۶۵ روزه یا ۱۵ روزه باشد (Ekhtiari Khajeh & Din pajouh, 2018). پس از انتخاب دوره فرضی مراحل محاسبات آغاز می‌شود. ابتدا بارش مؤثر یا EP با استفاده از رابطه (۳۲) به دست می‌آید:

$$EPi = \sum_{n=1}^{i}[(\sum_{m=1}^{n} P_m) / n] \quad (۳۲)$$

که در آن i تداوم فرضی و Pm مقدار بارش در m-1 روز قبل (میلی‌متر) است. مقدار بارش مؤثر از جمع‌کردن بارش با یک تابع کاهشی وابسته به زمان به دست می‌آید. در حقیقت بارش مؤثر که برای هرروز از دوره آماری موردمطالعه قابل‌محاسبه است، تابعی از بارندگی همان روز و یک دوره ماقبل خود است؛ به‌طوری‌که بارش‌های اخیر نسبت به بارش‌های قدیمی‌تر وزن بیشتری را در EP به خود اختصاص می‌دهند (Ekhtiari Khajeh & Din pajouh, 2018). در مرحله بعد از رابطه (۳۳) استفاده می‌شود:

$$DEP_i = EP_i - MEP_i \quad (۳۳)$$

که در آن MEP_i میانگین بارش مؤثر چندساله (میلی‌متر)، EP_i بارش مؤثر (میلی‌متر) و DEP_i به‌عنوان اختلاف بین EP_i و MEP_i شناخته می‌شود و واحد آن نیز میلی‌متر است. اگر مقدار DEP_i مثبت باشد ذخیره آب در همان تاریخ و مکان را نشان می‌دهد و اگر منفی باشد معنی عکس می‌دهد. به‌منظور مقایسه نتایج مناطق

1. Effective Drought Index

مختلف بدون در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی آن‌ها مقدار DEP_i با استفاده از رابطه (۳۴) استاندارد می‌شود:

$$SEP_i = DEP_i / ST(EP_i) \quad (۳۴)$$

که در آن $ST(EP_i)$ انحراف معیار بارش مؤثر (میلی‌متر) برای هرروز از دوره فرضی و SEP_i نیز مقدار استانداردشده DEP_i (میلی‌متر) است. مقادیر منفی مربوط به DEP_i و SEP_i نشان می‌دهد که بارندگی کمتر از حد نرمال بوده و دوره خشک اتفاق افتاده است. تداوم واقعی خشکی نیز از جمع بستن دوره فرضی با دوره تر یا خشک به دست می‌آید و برای هرروز از دوره آماری تداوم واقعی محاسبه می‌شود. سپس بارندگی موردنیاز برای برگشت به شرایط نرمال روزانه (PRN_j) به دست می‌آید:

$$PRN_j = DEP_j / \sum_{N=1}^{j}(\frac{1}{N}) \quad (۳۵)$$

که در آن اندیس j نشان‌دهنده تداوم واقعی، PRN_j مقدار بارندگی برای برگشت به شرایط نرمال از کمبود بارش را به میلی‌متر نشان می‌دهد. سپس شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI_j) به دست می‌آید:

$$EDI_j = PRN_j / ST(PRN_j) \quad (۳۶)$$

که در آن $ST(PRN_j)$ انحراف معیار PRN_j است و EDI_j به میلی‌متر درواقع وضعیت خشکی را مستقل از شرایط آب و هوایی نشان می‌دهد. PRN_j را می‌توان به‌عنوان شدت خشک‌سالی ارزیابی نمود. EDI_j درواقع شکل استانداردشده PRN_j بوده و به‌عنوان شدت خشک‌سالی معرفی می‌شود.

جدول ۱۰- طبقات مختلف نمایه EDI

Table 10- Different categories of EDI index

طبقات شدت خشک‌سالی	نمایه بارش مؤثر
بسیار شدید	EDI ≤ -2
شدید	-2 < EDI≤ -1.5
ملایم	-1.5< EDI≤ -1
نرمال از نظر بارش	-1 < EDI≤ +1

Morid و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که شاخص EDI قادر به شناسایی زمان شروع خشک‌سالی است و می‌تواند برای تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی نیز به کار برود. شاخص خشک‌سالی مؤثر ازجمله شاخص‌هایی است که بر اساس مقدار بارش روزانه تجمعی با روش وزن دهی استوار است (Moggadasi *et al.*, 2005). این روش تنها روش شناخته‌شده است که خشکی روزانه و همچنین دوره‌های خشک که به مدت چندین سال به‌طور انجامیده‌اند را تعیین می‌کند. شاخص EDI پاسخ سریع‌تری به شرایط خشکی اضطراری از خود نشان می‌دهد و نیاز به سری روزانه داده‌های بارش به‌عنوان نقطه‌ضعف این شاخص شناخته می‌شود. Jain و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که شاخص EDI به‌این‌علت که از بازه زمانی خاصی برخوردار نیست همبستگی بهتری با سایر شاخص‌ها در تمامی بازه‌های کوتاه و بلندمدت از خود نشان می‌دهد و همچنین دریافتند که این شاخص خشک‌سالی را زودتر از سایر شاخص‌ها پیش‌بینی می‌کند که این مزیت بزرگی برای یک شاخص خشک‌سالی محسوب می‌شود.

۱۳) شاخص معیار بارندگی سالانه (SIAP)

اساس محاسبه شاخص بارندگی سالانه، انحراف داده‌های بارندگی از نرمال است. در این شاخص ابتدا مجموع بارش‌ها در یک سال از میانگین مجموع بارش در یک دوره آماری کاسته و جواب حاصل در مرحله بعد بر انحراف معیار داده‌های دوره آماری موردنظر تقسیم می‌گردد. Khalili و Bazrafshan (۲۰۰۳) بیان کردند که شاخص‌های دهک بارندگی و شاخص معیار بارندگی سالانه (SIAP) بهترین کاربرد را برای ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در ایران را دارند که معادله آن به شرح رابطه (۳۷) است و طبق جدول (۱۱) طبقه‌بندی می‌شود.

$$SIAP = (p_i - \overline{p}) / SD \quad (۳۷)$$

p_i = بارندگی سال هیدرولوژی iام، $\overline{p}$ = میانگین بارندگی در طول دوره آماری، SD= انحراف معیار داده‌های بارندگی

جدول ۱۱- طبقات مختلف شاخص SIAP
Table 11- Different Classes of SIAP Index

شدت خشک‌سالی	شاخص معیار بارندگی سالانه
سال خیلی مرطوب	مساوی یا بیشتر از 1
سال مرطوب	0.5 تا 1
سال نرمال	0.5- تا 0.5
سال خشک	بین 1- تا 0.5-
سال بسیار خشک	کمتر از 1-

۱۴) شاخص خشک‌سالی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور

در این شاخص به کمک تصاویر ماهواره‌ای سنجده MODIS و سایر سنجنده‌ها مانند AVHRR ماهواره NOAA و غیره استفاده می‌شود و به محاسبه شاخص‌های سنجش از دور VCI (شاخص پوشش گیاهی) و LST (شاخصی برای محاسبه دمای زمین برحسب کلوین) و NDVI (شاخص پوشش گیاهی) و غیره پرداخته می‌شود. در این روش از تصاویر ماهواره‌ای با توجه به گستردگی مناطق موردمطالعه برای بررسی احتمال وقوع خشک‌سالی با قدرت تفکیک مکانی مختلف استفاده می‌شود. Shamsipour و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور در مطالعات محیطی مناطق خشک و بیابانی مناسب است. Baghideh و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که NDVI می‌تواند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های اقلیمی در ارزیابی خشک‌سالی‌ها باشد. Reza'i Moqaddam و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که شاخص VCI و سنجنده MODIS می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی باشند. Hellden و Christian (۲۰۰۸) بیان کردند که بین بارندگی و NDVI دارای همبستگی فراوانی در بیشتر مناطق خشک دنیا است.

۱۵) شاخص توزیع نرمال استاندارد (Z)

استفاده از شاخص توزیع استاندارد (Z)، یکی از شاخص‌های اساسی در مطالعه تغییرات حول مرکز به شمار می‌آید که از رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود:

$$Z = Xi - \mu/\delta = (Xi - \overline{X}) / S \qquad (۳۸)$$

که Xi بارش در زمان مشخص، $\overline{X}$ میانگین بارش و μ میانگین نمونه، S انحراف معیار نمونه و δ انحراف معیار جامعه طولانی‌مدت سری زمانی موردمطالعه است. میانگین و انحراف معیار این عامل برابر صفر و یک است و بنابراین ازنظر مقایسه‌ای بین ایستگاه‌های مختلف می‌تواند کاربرد زیادی داشته باشد. نکته قابل‌توجه در این شاخص، محاسبه احتمالات از طریق جداول توزیع نرمال است. در توزیع نرمال ۶۸/۲ درصد داده‌ها در بین $X\pm\delta$، ۹۵/۴ درصد در بین $X\pm2\delta$ و ۹۹/۷ درصد بین $X\pm3\delta$ قرار دارند. با توجه به ارزش حاصل از این شاخص طبقه‌بندی جدول (۱۲) را بر پایه شدت خشک‌سالی عنوان کرده‌اند.

جدول۱۲- طبقه‌بندی شاخص خشک‌سالی توزیع نرمال استاندارد (Z)
Table 12- Classification of Standard Normal Distribution Drought Index (Z)

ارزش شاخص	نوع خشک‌سالی
0.01-1	خشک‌سالی جزئی
1.1-2	خشک‌سالی متوسط
2/1-3	خشک‌سالی شدید
>3	خشک‌سالی فاجعه آور

۱۶) شاخص بارش – تبخیر و تعرق استانداردشده (SPEI)

شاخص بارش – تبخیر و تعرق استانداردشده بر اساس میزان بارش و درجه حرارت و محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل و بیلان آب ارائه‌شده است (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). این شاخص به‌وسیله Vicente-Serrano و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه شد و به‌عنوان یک شاخص خشک‌سالی اقلیمی معرفی شد. این شاخص مبتنی بر

محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. این شاخص توانایی محاسبه شاخص خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را دارد و همچنین می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشک‌سالی لحاظ نماید (Nosrati, 2014). معادله ترازمندی آب اقلیمی به‌صورت رابطه (۳۹) تعریف شده است:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (۳۹)$$

که در آن P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D اختلاف آن‌ها و i شماره ماه موردنظر است. این شاخص از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس رویکرد تورنت وایت استفاده می‌نماید.

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه (۴۰) محاسبه می‌شوند:

$$D_n^K = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (۴۰)$$

که kها (ماه‌ها) مقیاس زمانی موردنظر و n ماه موردنظر در محاسبه است. ضمناً یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشک‌سالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی برای سری زمانی داده‌ها در مقیاس زمانی مختلف دارد؛ بدین ترتیب تابع تجمعی احتمال سری داده‌های D بر اساس تابع لجستیک لگاریتمی است. Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی توابع مختلف سه پارامتری، تابع چگالی احتمال لوگ – لجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر Di تشخیص دادند. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به‌صورت رابطه (۴۱) است:

$$f(x) = (\beta/\alpha)\,(x-\gamma/\alpha)]^{\beta-1}\ [1 + (x-\gamma/\alpha)^{\beta}]^{-2} \quad (۴۱)$$

فرم تابع احتمال تجمعی لوگ – لجستیک سه پارامتری نیز مطابق رابطه (۴۲) به دست می‌آید:

$$F(x) = [1 + (\alpha / x-\gamma)^{\beta}]^{-1} \quad (۴۲)$$

که α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل، γ پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده $\gamma > D < \infty$ است. بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد (Vicente-Serrano *et al*., 2010). در گام نهایی مقادیر احتمال تجمعی برای مقادیر Di به تابع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ تبدیل می‌شوند که برابر مقادیر شاخص SPEI می‌باشند. تابع کلاسیک Abramowitz و Stegun (۱۹۶۵) با استفاده از مقادیر تابع F(x) تخمینی برای مقدار شاخص SPEI است.

$$SPEI=W-(c_0+c_1w+c_2w^2/(1+d_1w+d_2w^2+ d_3w^3) \quad (۴۳)$$

مقدار w از رابطه (۴۴) محاسبه می‌شود:

$$W = \sqrt{-2\ln(p)} \quad \text{for} \quad p\leq 0.5 \quad (۴۴)$$

که در آن p مقدار احتمال تجاوز از مقدار D تعیین شده است، $P = 1–F(x)$، اگر مقدار P بزرگ‌تر از 0.5 باشد آنگاه مقدار P با 1-P جایگزین و علامت نتایج SPEI تعویض می‌گردد. مقدار ضریب ثابت‌ها برابرند با $C_0=2.515517$، $C_1=0.802853$، $C_2=0.010328$، $d_1=1.432788$، $d_2=0.189269$، $d_3=0.001308$ می‌باشند. شاخص SPEI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه گردد. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورداستفاده قرار گیرد. خشک‌سالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. مقدار SPEI صفر نشان‌دهنده مقدار متناظر با مقدار ۵۰ درصد در تابع توزیع تجمعی مقادیر D بر اساس تابع توزیع احتمال لوگ – لجستیک است (Vicente-Serrano *et al*., 2010).

جدول۱۳- طبقه‌بندی مقادیر شاخص SPEI
Table 13- Classification of SPEI index values

طبقات شاخص	توصیف وضعیت
>2	رطوبت بسیار شدید
1.99–1.5	رطوبت شدید
1.49–1	رطوبت متوسط
-0.99-0.99	نرمال
-1.49 - -1	خشک‌سالی متوسط
-1.99 - -1.5	خشک‌سالی شدید
< -2	خشک‌سالی خیلی شدید

بر اساس نتایج تحقیق Nosrati (۲۰۱۴) شاخص بارش – تبخیر و تعرق استانداردشده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشک‌سالی در مقایسه با شاخص بارش استاندارد ارائه می‌دهد. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در بیلان آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک شاخص بارش – تبخیر و تعرق استانداردشده می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب در مطالعات خشک‌سالی مورداستفاده قرار گیرد. شاخص SPEI در جمهوری چک موردبررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که صرف‌نظر از مقیاس زمانی، این شاخص دارای قابلیت تشخیص شدت خشک‌سالی تحت تأثیر افزایش شرایط دمایی در دهه‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ است (Potop & Možný, 2011). شاخص خشک‌سالی SPEI با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی بارندگی و تبخیر و تعرق می‌تواند تغییرات منابع آب را در مقایسه با شاخص‌هایی که تنها از بارندگی استفاده می‌نمایند، توجیه نماید که از مزیت‌های این شاخص محسوب می‌گردد. این شاخص می‌تواند یک شاخص حساس به خشک‌سالی هیدرولوژیک و راهی برای ارتباط بین خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک باشد که اهمیت پایش آن توسط محققان دیگر (Nosrati, 2012) تائید شده است. ضمناً Gocic و Trajkovic (۲۰۱۴) بر پایه کمبود آب تعریف‌شده در شاخص SPEI، تفاوت بارش و تبخیر و تعرق (D)، از استاندارد نمودن مقادیر D بر اساس میانگین و انحراف معیار هر سری شاخص تغییرات آب مازاد را پیشنهاد دادند. مهم‌ترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پایش خشک‌سالی این است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی و کمبود آب را داراست (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) و برخلاف شاخص SPI با مشکل برازش تابع احتمال بر داده‌های صفر در مناطق خشک و ماه‌های خشک روبرو نیست (Stagge *et al.*, 2015). شاخص SPEI همچنین در خشک‌سالی‌های شدید و بسیار شدید عملکرد بهتری دارد که دلیل آن را می‌توان به تغییرات بارندگی و منظور نمودن درجه حرارت در این شاخص نسبت داد (Piry & Mobaraki, 2021).

۱۷) شاخص خشک‌سالی دبی جریان (SDI)[1]

این شاخص شبیه شاخص بارش استاندارد است که تحت عنوان شاخص دبی جریان بر اساس متوسط جریان ماهانه برای اولین بار توسط Ben-Zvi در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد گردید. اصول محاسباتی شاخص SDI مشابه شاخص SPI بوده و بدین‌صورت است که مقادیر دبی ماهانه هر ایستگاه هیدرومتری بر توزیع آماری مناسبی برازش داده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که در حوضه کوچک توزیع گاما و در حوضه‌های بزرگ توزیع نرمال یا لوگ نرمال دومتغیره بهترین برازش را دارد لذا مقادیر دبی ماهانه با استفاده از رابطه‌های (۴۵) و (۴۶) برای توزیع گاما برازش داده می‌شود:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \qquad (۴۵)$$

α پارامتر شکل و β پارامتر مقیاس است و X مقدار دبی و $\Gamma(\alpha)$، تابع گاما بوده و از رابطه (۴۶) محاسبه می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \qquad (۴۶)$$

1. Stream Flow Drought Index

سپس احتمال تجمعی توزیع گاما محاسبه و تغییر شکل هم احتمال تجمعی توزیع گاما به‌صورت نرمال صورت می‌گیرد و از رابطه (۴۷)، SDI مربوط به هر مقدار دبی در هر ایستگاه در سطوح هم احتمال منحنی احتمال تجمعی نرمال استخراج می‌گردد.

$$SDI_{i,k} = (Q_{i,k} - \overline{Q_k}) / SD_k \qquad (۴۷)$$

مقیاس K ام (۳، ۶، ۹ تا ۴۸ ماه)؛ $Q_{i.k}$ مقدار دبی در ماه i ام؛ $\overline{Q_k}$ مقدار متوسط دبی در مقیاس k ام؛ SD_k انحراف معیار در مقیاس K ام. Tabari و همکاران (۲۰۱۳) اقدام به ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI در شمال غرب ایران کردند و نشان دادند، تقریباً تمام ایستگاه‌ها تحت تأثیر خشک‌سالی شدید هستند. شاخص SDI به‌خوبی نوسانات خشک‌سالی را نشان می‌دهد (Jahangir *et al.*, 2019). Soleimani و Bahremand (۲۰۱۴) بیان کردند که همبستگی بالایی بین دو شاخص SPI و SDI وجود دارد. Nalbantis (۲۰۰۸) بیان کرد که شاخص SDI فاکتور مناسبی برای برآورد خشک‌سالی هیدرولوژیکی است. در حال حاضر کاربرد شاخص SDI مبتنی برفرض پیروی داده‌های جریان سطحی ماهانه از توزیع گاما است؛ درنتیجه هرگونه عدم پیروی مناسب سری داده‌های متوسط آبدهی ماهانه از توزیع گاما، می‌تواند پایش خشک‌سالی هیدرولوژیکی را با نقص مواجه ساخته و احتمالاً سبب جابه‌جایی طبقات خشک‌سالی گردد (Jamal *et al.*, 2020)؛ بنابراین لازم است که پیش از محاسبه شاخص SDI، توزیع فراوانی مناسب بر مقادیر آبدهی برازش یافته و بر اساس آن مقدار تصحیح‌شده شاخص SDI محاسبه گردد.

جدول ۱۴- طبقات مختلف نمایه SDI

Table 14- Different categories of SDI index

طبقات شدت خشک‌سالی	نمایه‌ی بارش مؤثر
فاقد خشک‌سالی	$0 \leq SDI$
خشک‌سالی ملایم	$-1 \leq SDI < 0$
خشک‌سالی متوسط	$-1.5 \leq SDI < -1$
خشک‌سالی شدید	$-2 \leq SDI < -1.5$
خشک‌سالی بسیار شدید	$SDI < -2$

۱۸) شاخص GRI و SWI برای محاسبه خشک‌سالی

شاخص GRI[1] در سال ۲۰۰۸ توسط Mendicino و همکاران به‌عنوان شاخص قابل‌اعتماد برای مدل‌سازی، پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شد. این شاخص در کالابریای ایتالیا آزمایش‌شده است و تاکنون این شاخص به‌عنوان جدیدترین و پرکاربردترین شاخص با ۴۰ سال داده شبیه‌سازی‌شده آزمایش شده است. ضمناً برای پایش خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی در مناطق مدیترانه‌ای این شاخص بهتر از شاخص‌های دیگر است (Nico *et al.*, 2010). مهم‌ترین مزیت این شاخص همبستگی بالای آن با متوسط رواناب در برخی از رودخانه‌های حوضه در پیش بینی خشک‌سالی‌های فصل تابستان است (Mendicino *et al.*, 2008). شاخص GRI با استاندارد کردن سطح سفره آب زیرزمینی با محاسبه اختلاف میان سطح آب سفره و میانگین بلندمدت آن و تقسیم بر انحراف معیار سطح ۹۹ درصد شاخص سطح آب استاندارد به دست می‌آید:

$$GRI = (D_{y.m} - \mu_{D.m}) / \sigma_{D.m} \qquad (۴۸)$$

که در آن GRI ارزش شاخص منبع آب زیرزمینی در ماه m از سال y؛ $D_{y.m}$ که ارزش سطح ایستابی در ماه m از سال y، $\mu_{D.m}$ میانگین داده‌های سطح ایستابی ماه m برای

1.Groundwater Resource Index

D سال، $\sigma_{D.m}$ انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال. GRI یک شاخص کاهش سطح سفره و یک معیار غیرمستقیم از میزان تغذیه سفره و یک منبع غیرمستقیم از خشک‌سالی خواهد بود. ازآنجایی‌که سطح سفره از سطح زمین در جهت پایین اندازه‌گیری می‌شود؛ بنابراین مقادیر مثبت نشانه وقوع خشک‌سالی و مقادیر منفی حاکی از عدم وقوع خشک‌سالی است. مقادیر این شاخص تغییرات مکانی زیادی دارد و نسبت به خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه موردمطالعه نیز حساس است (Mendicino *et al.*, 2008). شاخص سطح آب استانداردشده توسط Bhuiyan در سال ۲۰۰۴ ارائه شد و هدف از آن بررسی نوسانات و آنومالی‌های سطح آب زیرزمینی در هندوستان بود (Roshan *et al.*, 2019) که معادله محاسباتی آن به‌صورت رابطه (۴۹) است:

$$SWI = (W_{ij} - W_{im}) / \sigma \qquad (۴۹)$$

که در آن W_{ij} سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری i تا j؛ W_{im} میانگین ماهانه سطح ایستابی و σ انحراف معیار است (Bhuiyan, 2004). مطابق این شاخص‌ها شدت خشک‌سالی در ۵ طبقه تقسیم‌بندی می‌شود که مقادیر مثبت نشان‌دهنده خشک‌سالی و مقادیر منفی نشان‌دهنده عدم خشک‌سالی و شرایط نرمال است (Faridpour *et al.*, 2019). Pathak و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که همبستگی خوبی بین شاخص‌های SDI و GRI در مقیاس‌های ۹ ماهه وجود دارد که با افزایش مقیاس زمانی به ۲۱ ماهه این ارتباط بیشتر می‌شود. همچنین شاخص GRI خود همبستگی بسیار بالایی را در طول ماه‌های تابستان دارد و در هر منطقه‌ای توسط شرایط زمین سنگ‌شناسی آن توصیف می‌شود (Medicino *et al.*, 2008).

جدول ۱۵- طبقات مختلف نمایه GRI و SWI

Table 15- Different categories of SDI index

طبقات شدت خشک‌سالی	مقادیر SWI	مقادیر GRI
فاقد خشک‌سالی	<0	>0
خشک‌سالی ملایم	0.1-0.99	-0.99 - -0.1
خشک‌سالی متوسط	1-1.49	-1.49 - -1
خشک‌سالی شدید	1.5-1.99	-1.99 - -1.5
خشک‌سالی بسیار شدید	بزرگ‌تر یا مساوی 2	کوچک‌تر یا مساوری 2-

۱۹) شاخص خشک‌سالی بالم و مولی (BMDI[1])

یکی از شاخص‌های رایج جهت بررسی خشک‌سالی، شاخص Bahlme و Mooley است (Pourhossein & Soltani, 2018). این شاخص برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ توسط Bahlme و Mooley برای رژیم‌های مونسونی در هندوستان استفاده‌شده است. مقیاس زمانی محاسبه این شاخص ماهانه و سالانه است. شیوه محاسبه شاخص خشک‌سالی بالم و مولی شبیه به شاخص شدت خشک‌سالی پالمر بوده و شاخص به‌صورت بازگشتی عمل می‌کند یعنی در محاسبه خشک‌سالی یک ماه معین، ضریبی از شدت خشک‌سالی ماه قبل نیز دخالت داده می‌شود. این شاخص به‌صورت ذیل بیان می‌شود:

مرحله اول: محاسبه میانگین درازمدت داده‌های بارش $\overline{X}$ و انحراف از معیار داده‌های بارش σ و برآورد شاخص رطوبت ماهانه (MI) از رابطه (۵۰):

$$MI = ((X - \overline{X}) / \sigma) * 100 \qquad (۵۰)$$

مرحله دوم: تعیین کمترین مقدار MI در دوره موردبررسی و محاسبه مقادیر تجمعی و برازش خط رگرسیونی بر مقادیر شاخص رطوبت تجمعی ماهانه با استفاده از اصل کمترین مربعات که معادله کلی آن به‌صورت رابطه (۵۱) است:

$$\sum_{i=1}^{k} MI_k = a + bk \qquad (۵۱)$$

در این رابطه MI_k: شاخص رطوبتی تجمعی در ماه؛ k و K: شماره ماه و a و b: ضرایب ثابت معادله است.

1. Bhalme and Mooly Drought Index

مرحله سوم: استخراج معادلات خطوط برازش یافته بر چهار طبقه خشک‌سالی به‌طوری‌که مقادیر شدت خشک‌سالی واگذارشده به این خطوط را بتوان تعیین کرد. معادله کلی خطوط به‌صورت رابطه (۵۲) است:

$$I_k = \sum_{t=1}^{k} \frac{MI_t}{[\,0.25\,(|a| + |b|k)]} \qquad (۵۲)$$

در این رابطه I_k شدت خشک‌سالی ماه K ام است. با استفاده از این رابطه سهم شاخص رطوبتی MI در شدت خشک‌سالی را برای هرماه می‌توان با قرار دادن k=1 در آن تعیین کرد؛ بنابراین:

$$I_1 = \sum_{1}^{1} \frac{MI_1}{[\,0.25\,(|a| + |b|)]} \qquad (۵۳)$$

مرحله چهارم: در ماه‌های متوالی به یک مقدار منفی از شاخص رطوبتی نیاز است تا دوره خشک با شدت خشک‌سالی معین حفظ شود. میزانی که شاخص رطوبتی باید افزایش یابد تا مقدار I ثابت بماند، به مقدار I حفظ‌شده، بستگی دارد؛ بنابراین برای همه ماه‌هایی که در پی ماه خشک اولیه قرار می‌گیرند، لحاظ کردن یک عبارت اضافی در مرحله سوم ضروری بوده تا این معادله به‌صورت رابطه (۵۴) بیان شود:

$$\Delta I_k = (MI_k / d) + CI_k - 1 \qquad (۵۴)$$

در این رابطه d و c: ضرایب ثابت معادله و $c= 0.25(b/d)$ و $d=0.25|a+b|$ هستند.

مرحله پنجم: درنهایت فرم کلی شاخص خشک‌سالی بالم و مولی برای هرماه و برای کل دوره به‌صورت روابط ذیل نوشته می‌شوند (Pourhossein & Soltani, 2018):

$$I_k = (M_k / d) + (1+C)I_{k-1} \qquad (۵۵)$$

$$BMDI = \sum_{i=1}^{k} I_k / K \qquad (۵۶)$$

جدول۱۶- طبقه‌بندی مقادیر شاخص بالم و مولی

Table 16- Classification of Bhalme and Mooley index values

طبقات شاخص	توصیف وضعیت
0.99 تا-0.99	نزدیک نرمال
-1 تا -1.99	خشک‌سالی ضعیف
-2 تا -2.99	خشک‌سالی متوسط
-3 تا-3.99	خشک‌سالی شدید
-4 >	خشک‌سالی بسیار شدید

Pourhossein و Soltani (۲۰۱۸) دریافتند که شاخص بالم و مولی بهترین نتیجه را در اقلیم‌های مرطوب داشته است. همچنین این شاخص در رژیم‌های شبه مدیترانه‌ای در تمامی مقیاس‌های زمانی نتیجه مناسبی داشته است؛ اما در رژیم‌های بارش مدیترانه‌ای، بهترین نتیجه را در دوره‌های ارزیابی منطبق بر بارش نشان داد. Oladipo (۱۹۸۵) بیان می‌کند که شاخص خشک‌سالی بالم و مولی به دلیل سادگی و دخالت فاکتورهای اندک، قابلیت سازگاری با هر شرایط اقلیمی و کمی فاکتورهای مورداستفاده بهتر و مناسب‌تر است. در ضمن بیان می‌کند که این شاخص توانایی ارزیابی خشک‌سالی‌ها را ازنظر بزرگی و مقدار داشته و برای پیش‌بینی خشک‌سالی منطقه‌ای بهتر است. Shayegh و Soltani (۲۰۱۱) بیان کردند که شاخص خشک‌سالی بالم و مولی در طی دوره‌های ارزیابی ۷ و ۹ ماهه که محدود به دوران بارش است قابلیت خوبی در مقایسه سال‌های آماری ازنظر شدت خشک‌سالی در یک ماه معین دارد. شاخص خشک‌سالی بالم و مولی علاوه بر رژیم‌های مونسونی، قابلیت استفاده در سایر اقلیم‌ها را نیز دارد و هرچه طول دوره ارزیابی این شاخص بر دوره وقوع بارش در یک سال منطبق‌تر باشد شاخص بهتر و مؤثرتر عمل می‌کند (Pourhossein & Soltani, 2018).

نتیجه‌گیری کلی

هر شاخصی با توجه به ماهیتی که دارد می‌تواند در مناطق مختلف مورداستفاده قرار گیرد و همه شاخص‌ها به‌نوبه خود و در مناطق سازگار با ماهیت این شاخص‌ها می‌توانند پیش‌بینی مناسبی از خشک‌سالی داشته باشند و مقایسه تمام این شاخص‌ها برای یک منطقه خاص اشتباه است و نتایج مناسبی نخواهند داد بلکه باید شاخص مناسب با توجه به شرایط آب و هوایی و سایر شرایط دیگر مناطق موردمطالعه انتخاب شود. ضمناً مقیاس زمانی نیز در هرکدام از شاخص‌ها بسیار مهم است

و باید برای حصول نتیجه قابل‌اطمینان‌تری در نظر گرفته شود. بررسی‌ها نشان داد که شاخص‌های دهک‌ها، بارش استانداردشده، شدت خشک‌سالی پالمر، شاخص گیاهی اختلاف نرمال شده، شاخص بارش – تبخیر و تعرق استانداردشده و شاخص بالم و مولی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی است. هم‌چنین ضعیف‌ترین شاخص خشک‌سالی موردمطالعه، شاخص درصد نرمال بارش و قوی‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی، شاخص‌های بارش – تبخیر و تعرق استاندارد و شاخص بالم و مولی می‌باشند. میزان استمرار حالت خشک‌سالی در یک منطقه گویای شدت خشک‌سالی در همان منطقه است. شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در سطح ایران و دنیا بیشتر به مقوله شدت خشک‌سالی اهمیت داده‌اند به‌طوری‌که بیشتر شاخص‌های موجود در ایران و دنیا روی شدت خشک‌سالی تمرکز بیشتری دارند و این نکته از نقاط قوت شاخص‌های خشک‌سالی موجود در ایران و دنیا است. به‌طورکلی تشخیص زمان آغاز و خاتمه خشک‌سالی مسئله بسیار مشکلی است. پایان خشک‌سالی نسبت به زمان آغاز محسوس‌تر است. شاخص‌های مختلف خشک‌سالی تمرکز کمتری بر روی مقوله مدت خشک‌سالی دارند به‌طوری‌که تشخیص ابتدای و انتهای خشک‌سالی به‌وسیله این شاخص‌ها امری به‌ندرت انجام‌شدنی است؛ بنابراین این نکته یکی از نقاط ضعف شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در ایران و دنیا است. همچنین شاخص‌های مختلف خشک‌سالی به‌ندرت به مقوله وسعت خشک‌سالی می‌پردازند؛ بنابراین این نکته نیز یکی از نقاط ضعف شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در ایران و دنیا است. فراوانی خشک‌سالی نیز از اهم ویژگی‌های موردمطالعه در بررسی یک منطقه به‌شمار می‌آید که می‌تواند در مقیاس‌های مختلف زمانی محاسبه شود. شاخص‌های مختلف خشک‌سالی با تمرکز کمتری به مقوله فراوانی خشک‌سالی می‌پردازند؛ بنابراین این نکته نیز یکی از نقاط ضعف شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در ایران و دنیا است. به‌طورکلی نتیجه‌گیری می‌شود که شاخصی برای خشک‌سالی می‌تواند در دنیا ماندگار شود که به شدت و مدت و فراوانی و وسعت خشک‌سالی به‌طور هم‌زمان بپردازند و بر این اساس است که قطعاً می‌تواند پیش‌بینی‌های مناسبی داشته باشد. برای استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی، مقیاس زمانی و مکانی مربوط به آن شاخص‌ها باید در استفاده از آن‌ها مدنظر قرار گیرد. با توجه به اینکه هرکدام از شاخص‌های خشک‌سالی در شرایط خاصی ایجادشده‌اند پیشنهاد می‌شود یا در ایران مورداستفاده قرار نگیرند و یا اینکه بااحتیاط مورداستفاده قرار گیرند. از نقاط ضعف دیگر شاخص‌های خشک‌سالی تعیین عوامل مؤثر بر خشک‌سالی و چگونگی آن‌ها بر شرایط خشک‌سالی است یعنی در تعیین عوامل مؤثر بر خشک‌سالی و چگونگی تأثیر آن‌ها شرایط خیلی سختی حاکم است که به‌سادگی نمی‌توان با شاخص‌های مختلف خشک‌سالی آن را به دست آورد. شاخص خشک‌سالی جامع و کامل، شاخصی است که تمامی عوامل مؤثر بر انواع خشک‌سالی مختلف را در نظر بگیرد و به نظر می‌رسد که در حال حاضر چنین شاخصی وجود ندارد و تمامی شاخص‌های خشک‌سالی بررسی‌شده دارای نقاط ضعفی هستند و نتایج حاصل از آن‌ها دارای درجه اطمینان پایین‌تری می‌باشند. هم‌چنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که پرکاربردترین پارامتر در شاخص‌های موردبررسی مقدار بارندگی است که در برخی از شاخص‌ها به‌عنوان تنها پارامتر تعیین‌کننده وضعیت خشک‌سالی است. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی پیشنهاد می‌گردد که در ارتباط با شاخص‌های خشک‌سالی با توجه به داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی ایران، مدل‌سازی‌های آماری رگرسیونی خطی و غیرخطی بومی با توجه به اقلیم‌های خاص ایران

صورت گیرد و شاخص چندمتغیره خشک‌سالی ایرانی معرفی شود که قطعاً نتایج ارزشمندتری به دنبال دارد.

References

Aaron, P.N., Devdutta, S.N. & Sethu, R. (2002). Adopting drought indices for estimating soil moisture: A North Carolina case study. *Geophysical Res. Leters,* 29(1), 1-40

Abramowitz, M., & Stegun, I.A. (1965). Handbook of mathematical functions, with formulas, graphs, and mathematical tables. Dover Publications.

Arshad, S., Morid, S., Mobasheri, M.R., Alikhani, M.A., & Arshad, S. (2013). Monitoring and forecasting drought impact on dryland farming areas. *International Journal of Climatology,* 33, 2068-2081.

Asadi Zarch, M.A., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Taghi Dastorani, M. & Kousari, M.R. (2011). Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resour Manag*, 25(13), 3485-3504.

Babaei, H., Araghinejad, S. & Hoorfar, A. (2013). Developing a new method for spatial assessment of drought vulnerability (Case study: Zayandeh Rood river basin in Iran). *Water and Environment Journal*, 27, 50-57.

Baghideh, M., Alijani, B. & Ziaeian, P. (2010). Investigating possibility of using NDVI index in drought analysis in Isfahan province, *Geographical studies of arid regions,* 1(4), 1-16.

Bazrafshan, J., Hejabi, S. & Habibi Nokhandan, M. (2010). Is the SPI sufficient for monitoring meteorological droughts in extreme costal climates of Iran? *Advances in Natural and Applied Sciences* 4(3), 345-351.

Bazrafshan, J. (2002). *The study of some meteorological drought indices in some Iranian climate samples.* MSc thesis, University of Tehran, Tehran. (In Persian)

Bhuiyan, C. (2004). Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India", of the XXth ISPRS Conference, Vol XXXV, Part B. Proceeding: orham altan, m., *International society for photogrammetry and remote sensing*, Istanbul: 1283-1288.

Chow, V.T. & Kareliotis, S.J. (1970). Analysis of stochastic hydrologic systems. *Water Resour.* Res. 6(6), 1596-1582.

Ekhtiari Khajeh, Sh. & Din pajouh, Y. (2018). Application of Effective Drought Index (EDI) for Drought Periods (Case Study: Tabriz, Bandar Anzali and Zahedan Stations), *Irrigation Science and Engineering,* 41(1), 133-145. (In Persian)

Elagib, N.A., & Elhag, M. (2011). Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology,* 409(3-4), 612-625.

Ensafee Moqaddam, T. (2007). Evaluation of several climatic drought indices and determining the most suitable index in Salt Lake basin, *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research,* 14(2), 271-288. (In Persian).

Eskandari Damaneh, H., Jafari, M., Behnia, M., Khoorani, A., & Tiefenbacher, J.P. (2021). Testing possible scenario-based responses of vegetation under expected climatic changes in Khuzestan Province. *Air, Soil and Water Research*, 14, doi: 10.11786221211013332.

Faridpour, M., Rezaei Banafsheh, M., Zaynali, B. & Asghari, S. (2019). Evaluate the effect geohydrological drought on groundwater quality for agricultural purposes (Case Study: Marand plain)", *Journal of Geographical Space*, 19(65), 17-36.

Felch, R.E., & Rosenberg, N.J. (1978). Drought: Characteristics and assessment. Chapter 2 IN North American droughts AAAS Selected Symposia. Editor Norman J. Rosenberg. *American Association for the Advancement of Sciences,* 15, 25-42.

Gocic, M. & Trajkovic, S. (2014). Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia, *Journal of Hydrology*, 510:110-123.

Guttman, N.B. (1998). Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *J. the Amer. Water Resour*, 34(1), 121-131.

Hayes, M.J. (2010). What is drought? National Drought Mitigation Center (NDMC), Home page: http://www.drought.unl.edu/.

Hayes, M. (2004). Drought Indices, National Drought Mitigation Center, Available on: Http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm.

Hayes, M.J. (2001). Drought Indices, National Drought Mitigation Center, NOAA Press, 11p.

Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wihite, D.A. & Vanyarkho, O.V. (1998). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of American Meteorological Society*, 80, 429-438.

Heim, R, Jr. (2002). A review of Twentieth-Century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1149-1165.

Hellden, U. & Christian, T. (2008). Regional Desertification: A Global Synthesis, *Global and Planetry Change*, 64(3-4), 169-176.

Hijabi, S., Irannejad, P. & Bazrafshan, C. (2018). Adjustment of PDSI Index Based on ALSIS in Karkheh Basin, *Iranian Journal of Water Resources Research*, 14(3), 2019-204.

Hisdal, H., Tallaksen, L. & Randen, F. (2005). Regional low flow and drought frequency analysis. *Geophysical Research Abstracts.* Vol. 7, l083.

Ivakumar, M.V.K., Motha, R.P., Wilhite, D.A. & Wood, D.A. (Eds.). (2011). Agricultural Drought Indices" Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 197 pp.

Jain, V.K., Pandey, R.P., Jain, M.K. & Byun, H.R. (2015). Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes*, 8, 1-11.

Jahangir, M, H., Babaei, S. & Norouzi, A. (2019). Assessment of Drought Status in Kermanshah Province Using SDI, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(13), 190-202.

Jamal, M., Ebrahimi, H. & Mousavi Jahromi, H. (2020). Modification of hydrological drought index based on determining the most suitable possible distribution, *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 9(4), 135-151.

Karamouz, M., Nazif S. & Ahmadi, A. (2013). Development of integrated drought evaluation and monitoring. system: Case study of Aharchay River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18, 897-910.

Karamouz, M., Rasouli K. & Nazif, S. (2009). Development of a hybrid index for drought prediction: case study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14, 617-627.

Karamouz, M., Torabi S. & Araghinejad, S. (2004). Analysis of hydrologic and agricultural droughts in central part of *Iran. Journal of Hydrologic Engineering*, 9, 402-414.

Keyantash, J.A., & Dracup, J.A. (2004). An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resour* Res, 40(9), W09304.

Khalili, A. & Bazrafshan, J. F. (2003). Multi-index meteorological efficiency evaluation in different climatic samples of Iran, *Nivar Journal*, 48, 79-93.

Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A.A., & Zand-Parsa, S. (2011). Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resource Management*, 25(6), 1737-1757.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J I., Beguería, S., García-Ruiz, J M. & Cuadrat, J.M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386, 13-26.

MacKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales.* Paper Presented at 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA.

McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. In Proc, 8th Conf. on Applied Climatology, January 17-22, American Meteorological Society, Massachusetts, Pp. 179-184.

McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J. (1995). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In Proc, 9th Conf. on Applied Climatology, January 15- 20, *American Meteorological Society, Massachusetts*, Pp. 233-236.

Mendicino, G., Senatore, A. & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology Journal*, 357, 282-302.

Meyer, S.J. & Hubbard, K.G. (1995). *Extending the crop-specific drought index to soybean.* 9th Con-ference on Applied Climatology. Dallas, TX. Me-teorol. Soc., Boston.

Miryaghoubzadeh, M.H., Khosravi, S.A. & Zabihi, M. (2019). A Review of Drought Indicators and Their Performance Review, *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(1), 103-112. (In Persian)

Moggadasi, M., Morid, S., Ghaemi, H. & Samani, J.M.V. (2005). Daily Drought Monitoring, Tehran Province. *Journal of Iranian Agriculture Science*, 36(1), 51-62. (In Persian)

Moghimi, M.M., Zarei, A. & Mahmoudi, M.R. (2020). Seasonal drought forecasting in arid regions, using different time series models and RDI index. *Wat. Clim. Change*, 11(3), 633-654.

Moreira, E.E., Coelho C.A., Paulo A.A., Pereira L.S. & Mexia J.T. (2008). SPI-based Drought Category Prediction Using Loglinear Models. *Journal of Hydrology*, 354, 116-130.

Morid, S, Smakhtin V, Moghaddasi M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26(7), 971-985.

Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4):69-88.

Nico, W.A.J., Lanen, V., & Loon, A.F. (2010). Indicators for Drought Characterization on A Global Scale. *Wageningen, Netherlands, Water and Global Change*, 24, 80-93.

Nosrati, K. (2012). Regional analysis of hydrological drought in Sefidrood Drainage Basin using base flow index. Journal of Range and Watershed Management. *Iranian Journal of Natural Resources*, 65(2), 257-26. (In Persian)

Nosrati, K. (2014). Evaluation of SPEI Index for Drought Detection in Different Climates of Iran, *Journal of Environmental Sciences*, 12(4), 63-74.

Oladipo, E.O. (1985). A comparative performance analysis of there meterological drought indices. *International Journal of Climatology*, 5, 655-664.

Palmer, W.C. (1965). Meteorological Drought. Research Paper No 45, office of climatology, S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C. 58p.

Panu, U.S. & Sharma T.C. (2002). Challenge in Drought Research: Some Perspectives and Future Directions, *Hydrological Science Journal*, 47, 19-30.

Pathak, A.A. & Dodamani B.M. (2016). Comparison of Two Hydrological Drought Indices. *Perspectives in Science*, 8, 626-628.

Piry, H., Rahdari, V. & Maleki, V.S. (2013). Investigation and comparison of the efficiency of four meteorological drought indexes in risk management of droughts in Sistan and Baluchestan province, *Irrigation and Water Engineering*, 11, 96-114. (In Persian)

Piry, H. & Mobaraki, M. (2021). Comparison of rainfall-based drought indices with evapotranspiration-based indices in order to determine meteorological drought. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 328-343.

Potop V., & Možný M. (2011). The application a new drought index–Standardized precipitation evapotranspiration index in the Czech Republic. Mikroklima a mezoklima krajinných structur an antropogenních prostředí, (2), 2-14.

Pourhossein, S. & Soltani, S. (2018). Investigating the effect of precipitation regime and statistical period on balm and mooly drought index in Iran, *Journal of Water and Soil Science*, 22(2), 159-173.

Ramezani Etedali, H., liaghat, A. & Parsinejad, M. (2012). Study of agricultural drought

situation based on soil moisture in Qazvin synoptic station, *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(1), 2002-2012.

Reza'i Moqaddam, M.H., Valizadeh, K., Rostamzadeh, E. & Rezaee, A. (2012). Evaluation of efficiency of MODIS data in drought estimation (Case study: Urmia Lake watershed), *Journal of Geography and Environmental Stability*, 2(5), 37-52.

Richard, R. & Heim J. (2002). A review of Twentieth-Century drought indices used in the United States. *American Meteorological Society*, 1149-1166.

Roshan, H., Habibnejad Roshan, M. & Shahedi, K. (2019). Study of groundwater level changes and drought indices of GRI and SWI in Sari neka plain, *Geographical Space Scientific Journal*, 19(67), 131-146.

Salehi Tabas, M., Yaghoubzadeh, M., Zamani, Gh. & Amir Abadizadeh, M. (2020). Evaluation 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), 776-785. (In Persian)

Savari, M., Eskandari Damaneh, H. & Eskandari Damaneh, H. (2022). Drought vulnerability assessment: Solution for risk alleviation and drought management among Iranian farmers. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102654.

Shafer, B. & Dezman L. (1982). *Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas.* Proceedings of the Western Snow Confer-ence. (Pp.164–175).

Shamsipour, A., Alavipanah, K. & Mohammadi, H. (2010). Investigatin the efficiency of Noaa-AVHRR satellite plant and thermal indices in drought analysis in Kashan region, Iranian *Journal of Rangeland and Desert Research*, 17(3), 445-465.

Shayegh, A., & Soltani, S. (2011). Comparison of meteorological drought indices in Yazd province, *Journal of Agricultural and Natural Resources Science and Technology, Soil and Water Sciences*, 57, 231-249.

Smakhtin, V.U. & Hughes D.A. (2004). Review, Auto-mated Estimation and Analyses of Drought Indi-ces in south Asia. *International Wter Management Institute*. Colombo, Sri Lanka.

Smith, K. (2000). Assessment Risk and Reduction Disasters. *Environmental Hazards Routledge* Pub., London.

Soleimani, F. & Bahremand, A. (2014). Hydrological Drought Analysis Using SDI Index in Halilrud Basin of Iran, *Environmental Resources Research*, 2, 47-56.

Sough, M.Q., Abyaneh, H.Z. & Mosaadi, A. (2017). Development of ADI index based on principal component analysis in order to monitor agricultural drought in Golestan province, Iran, *Journal of Water Resources Research*, 13(2), 56-73.

Sough, M.Q., Mosaadi, A. & Zare Abyaneh, H. (2016). *Necessity of drought monitoring based on multivariate indices*, 6th National Conference on Water Resources Management of Iran, University of Kurdistan, April 21-23, p. 1-10.

Stagge, J.H., Tallaksen L.M., Gudmundsson, L., Van Loon, A.F. & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027– 4040.

Tabari, H., Nikbakht, J. & Talaee, P.H. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on Streamflow Drought Index (SDI). *Water Resources Management*, 27(1), 11-22.

Tigkas, D., Vangelis, H. & Tsakiris, G. (2012). Drought and climate change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment* 440, 33-41.

Torabi Tabatabai, F. & Shamsnia, A. (2019). Comparison of different methods of estimation of potential evapotranspiration on the results of identification drought index (RDI) in Tehran province, *Journal of engineering water resources*, 11, 31-48.

Tsakiris, G., Pangalou, D. & Vangelis H. (2007). Regional drought assessment based on the

reconnaissance drought index (RDI). *Water Resource Management,* 21, 821–833.

Tsakiris, G. & Vangelis H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 9/10, 3-11.

Tsakiris, G. & Vangelis, H. (2004). Towards a drought watch system based on spatial SPI. *J. Water Resour. Manage*, 18, 1-12

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2004). Re-gional drought assessment based on the Recon-naissance Drought Index (RDI). *Water Resource Manage*, 21(5), 821–833.

Xu, J., Ren, L.L., Ruan, X.H., Liu, X.F. & Yuan, F. (2012). Development of a physically based PDSI and its application for assessing the vegetation response to drought in northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D8).

Van Loon, A.F. (2013). On the propagation of drought. Wageningen University.

Vicente-Serrano, S.M, Beguería, S. & López-Moreno, J.I. (2010). A multi–scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.

Wilhite, D.A. & Glantz M.H. (1985). Understanding The Drought Phenomenon, The Role of Defini-tions. *Water International*, 10(3), 111-120.

Willeke. G., Hosking J.R.M., Wallis J.R. & Guttman N.B. (1994). The National Drought Atlas. Institute for Water Resources Report, U.S. Army Corps of Engineers.

Wu, H., Hayes, M.J., Wilhite, D.A. & Svoboda, M.D. (2005). The effect of the length of record on the Standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology*, 25, 505-520.

Wu, H., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., Wilhite, D. & Wen, A.F. (2007). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid location and dry season. International *Journal of Climatology*, 27, 65-79.

Yan, D., Shi X., Yang Z., Li, Y., Zhao K. & Yuan, Y. (2013). Modified Palmer drought severity index based on distributed hydrological simulation. Mathematical Problems in Engineering.

Zoljoodi, M. & Didevarasl, A. (2013). Evaluation of spatial-temporal variability of drought events in Iran using Palmer drought severity index and its principal factors (through 1951-2005). *Atmospheric and Climate Sciences*, 3(2), 193-207.

Zoljudi, M. (2017). Evaluation of crop moisture index efficiency in drought monitoring, *Nivar Journal*, 2017, 54-57.