2019, Vol.6, No.1, Pages 103 to 112
Journal of Water and Sustainable Development

سال ششم، شماره ۱، ۱۳۹۸، صفحات ۱۰۳ تا ۱۱۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review

نوع مقاله: مروری

A Review of Drought Indices and their Performance

M. Miryaghoubzadeh[1*], S.A. Khosravi[2], M. Zabihi[3]

1,2- Assistant Professor & MSc Graduated, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Iran. 3- MSc Student of Watershed management, Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Iran.

*(Corresponding Author Email: m.miryaghoubzadeh@urmia.ac.ir)

Received: 29-07-2018
Accepted: 17-02-2019

Abstract

Drought is an inevitable natural phenomenon and a disaster that should be considered without the possibility of prevention, but this phenomenon can be managed and organised. In general, from a climate perspective, drought represents a type of deviation from the average condition. Drought types include agricultural, hydrological, and meteorological, where meteorological drought occurs more than the agricultural and hydrological drought types. To assess quantitatively and qualitatively of the drought phenomenon, some indicators called drought indices are commonly used in the world. In this study, considering the importance of drought, eight rainfall indices namely Deciles Precipitation Index (DPI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Percent of Normal Precipitation Index (PNPI), Surface Water Storage Index (SWSI), Standardised Precipitation Index (SPI), Crop Moisture Index (CMI), Reconnaissance Drought Index (RDI), and Rainfall Anomaly Index (RAI) were evaluated. The results of this study indicate that the SPI index has a high comparative advantage for drought monitoring. Based on rainfall and potential evapotranspiration, the RDI index is more sensitive to climate change variables than the rainfall-driven SPI index. Also, the PNPI indicator is a dysfunctional method for estimating drought, and drought prediction will have many errors due to this index. The CMI index is also limited to use only in the growing season. Also, it cannot determine the long duration of drought.

Keywords: Meteorological drought, Rainfall, Soil moisture content, Top index.

مروری بر شاخص‌های خشکسالی و بررسی عملکرد آن‌ها

میرحسن میریعقوب‌زاده[۱*]، سید امین خسروی[۲]، مصطفی ذبیحی[۳]

۱،۲- به ترتیب استادیار و دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه. ۳- دانشجوی کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، پردیس دانشگاهی نور.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: m.miryaghoubzadeh@urmia.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۷
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۸

چکیده

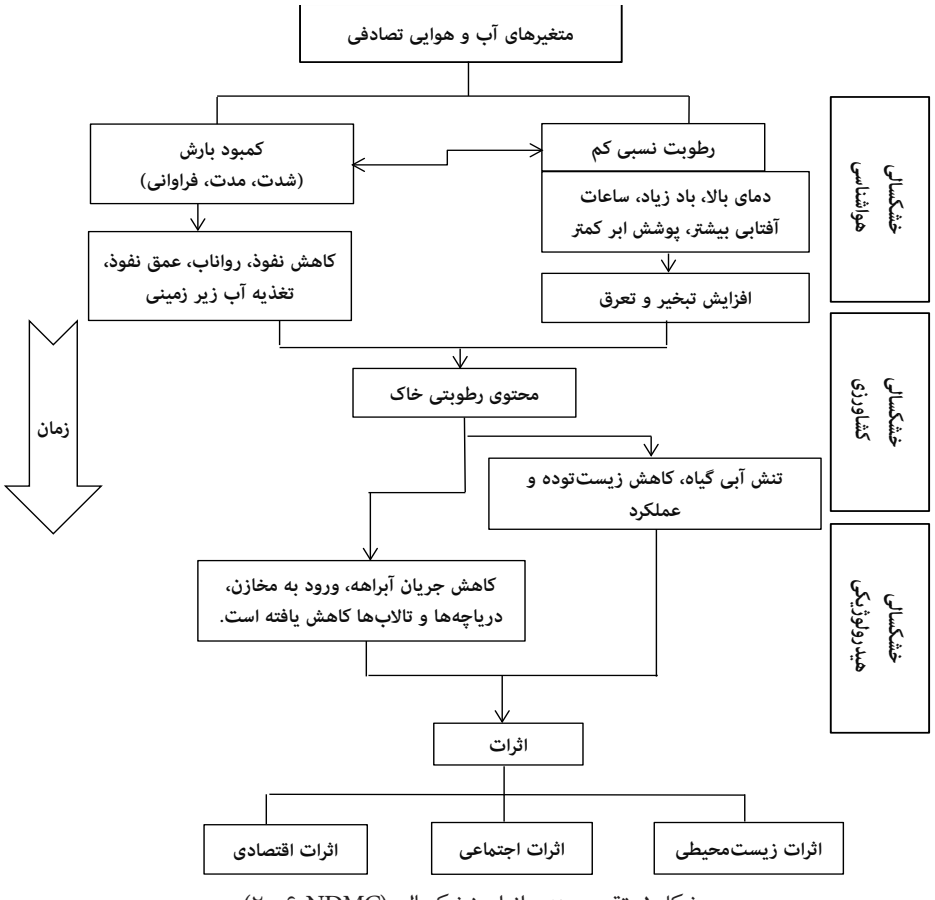
خشکسالی پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر و از جمله بلایایی است که آن را باید بدون امکان پیشگیری تلقی نمود اما می‌توان این پدیده را مدیریت و ساماندهی کرد. به‌طورکلی از دیدگاه اقلیمی خشکسالی به‌نوعی انحراف از شرایط متوسط را بیان می‌کند. انواع خشکسالی شامل کشاورزی، هیدورلوژی و هواشناسی است که خشکسالی هواشناسی بیشتر از کشاورزی و هیدرولوژیکی به وقوع می‌پیوندد. براي ارزیابی کمی وکیفی پدیده خشکسالی از شاخص‌هایی به‌عنوان شاخص‌های خشکسالی در سراسر دنیا استفاده می‌شود. در این تحقیق باتوجه‌به اهمیت خشکسالی هشت شاخص دهک‌های بارندگی (DPI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص درصد نرمال بارش (PNPI)، شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI)، شاخص بارش مؤثر (SPI)، شاخص رطوبت زراعی (CMI)، شاخص خشکسالی احیایی (RDI) و شاخص ناهنجاری‌های بارندگی (RAI) ارزیابی شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد شاخص SPI دارای مزیت نسبی بالایی برای پایش خشکسالی می‌باشد. باتوجه‌به اینکه شاخص RDI بر مبنای بارندگی و تبخیرتعرق پتانسیل محاسبه می‌شود نسبت به شاخص SPI که تنها بر مبنای بارندگی می‌باشد به متغیرها و تغییرات آب‌وهوایی حساسیت بیشتری دارد. همچنین شاخص PNPI روشی ناکارآمد برای ارزیابی خشکسالی بوده و پیش‌بینی خشکسالی باتوجه‌به این شاخص خطاهای زیادی خواهد داشت. شاخص CMI محدود به استفاده در فصل رشد است. همچنین نمی‌تواند مدت زمان طولانی خشکسالی را تعیین کند.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی، بارندگی، محتوی رطوبتی خاک، شاخص برتر.

DOI: 10.22067/jwsd.v6i1.74428

مقدمه

خشکسالی نتیجه کاهش میزان بارندگی در یک دوره زمانی وسیع است که بسته به نوع اقلیم آن منطقه ممکن است در مقیاس زمانی هفته، ماه، سال و یا حتی چندین سال حادث شود. خشکسالی را می‌توان به‌عنوان پدیده‌ای اجتناب ناپذیر و از جمله بلایایی که امکان پیشگیری ندارد اما قابل مدیریت و ساماندهی می‌باشد نام برد (Smakhtin و hughes، ۲۰۰۴). تاکنون تعریف دقیق و جهانی از پدیده خشکسالی که مورد پذیرش همگان باشد، ارائه نشده است. در اکثر تعاریف خشکسالی یک دوره پیوسته و پایدار اطلاق می‌شود که مقدار آب موجود در یک منطقه به حد قابل توجهی کاهش می‌یابد (Wilhite و Glantz، ۱۹۸۵). انواع خشکسالی شامل خشکسالی کشاورزی، خشکسالی هیدرولوژی و خشکسالی هواشناسی است که به گزارش ایران صالحوند و مؤمنی (۱۳۹۲) خشکسالی هواشناسی بیشتر از انواع کشاورزی و هیدرولوژیکی رخ می‌دهد. انواع خشکسالی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- تقسیم‌بندی انواع خشکسالی (NDMC، ۲۰۰۶)

خشکسالی یک اثر ممتد و تدریجی دارد و در دوره زمانی نسبتاً طولانی رخ می‌دهد. بنابراین با ایجاد طرح‌های آمادگی برای مدیریت آن تا حدی از مشکلات ناشی از این پدیده کاسته خواهد شد. این پدیده در هر منطقه‌ای می‌تواند رخ دهد و انسان یا محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهد درحالی‌که به گزارش Bordi و Sutera (۲۰۰۴) گسترش آن متفاوت است. برای ارزیابی کمی و کیفی پدیده خشکسالی معمولاً از شاخص‌هایی جهت تعیین شدت خشکسالی استفاده می‌شود (Panu و Sharma، ۲۰۰۲). محققان بسیاری برای مطالعه این پدیده از شاخص‌های تک پارامتری بر اساس بارندگی سالیانه یا ۱۲ ماهه ثابت به‌دلیل سادگی و قابل دسترس بودن داده‌های بارندگی در مناطق مختلف دنیا استفاده می‌کنند (Moreira و همکاران، ۲۰۰۸).

خشکسالی می‌تواند مناطق گسترده‌ای را فراگیرد و برای ماه‌ها تا سال‌ها تداوم یابد و آثار ویرانگری بر بخش‌های اقتصادی داشته باشد (Tallaksen و Van Lanen، ۲۰۰۴). اولین نشانه‌های خشکسالی در ثبت بارندگی مشاهده می‌شود، همچنین کمبود طولانی مدت 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 اثر این شرایط شروع به کاهش می‌کند. در نتیجه تغذیه سیستم آب زیرزمینی کم شده و ممکن است یک سال یا بیشتر سطح تراز آب چاه‌ها پس از شروع خشکسالی به کمبود بارندگی واکنش نشان دهد (Van Loon، ۲۰۱۳).

از گذشته سعی شده است شاخص‌های جامعی از قبیل PDSI (Palmer، ۱۹۶۵) و SWSI (Shafer و Dezman، ۱۹۸۲)که هر کدام نقاط قوت و ضعف دارند توسعه یابند. همچنین جهت توسعه شاخص‌های جامع چندگانه، بر اساس ترکیب چند متغیر یا شاخص نشانگر خشکسالی جامعی ارائه شده است.

Meyer و Hubbard (۱۹۹۵) نشان دادند شاخص‌های PDSI و CMIبرای کاشت ذرت به‌ویژه وقتی‌که با تنش‌های رطوبتی و گرمایی شدید مواجه می‌شود، معتبر نمی‌باشند. حسنی‌ها و صالحی (۱۳۷۹) از چهار شاخص درصد بارندگی میانگین، شاخص انحراف معیار، شاخص کلاسه‌بندی بارندگی و شاخص توزیع استاندارد برای بررسی وضعیت خشکسالی در استان زنجان استفاده کردند و نشان دادند شاخص‌های درصد از بارندگی میانگین، انحراف معیار و کلاسه‌بندی بارندگی همبستگی بالایی با یکدیگر دارند. همچنین براساس روند میانگین‌های متحرک سه ساله و پنج ساله شدت خشکسالی در استان زنجان رو به افزایش بوده و به تدریج بر دوره تداوم آن نیز افزوده می‌شود. Mackee و همکاران (۱۹۹۵) با مقایسه ضرایب همبستگی بین دو شاخص بارش استاندارد و پالمر که در مقیاس‌های زمانی متعدد انجام دادند، به این نتیجه رسیدند این دو شاخص حداکثر همبستگی را در مقیاس زمانی نزدیك به ۱۲ماه دارند که در این مقیاس ضریب همبستگی نزدیک به ۰/۹ و کمترین همبستگی مربوط به مقیاس زمانی ۲۴ ماه 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 بارش استاندارد به‌این‌ترتیب نیست و این شاخص یك روش ساده و با تغییر آسان است. Barua و همکاران (۲۰۱۱) شاخص‌های خشکسالی PNPI، SPI،SWSI و ADI به‌ازای داده‌های تاریخی رودخانه یارا واقع در استرالیا را ارزیابی نمودند و بر اساس معیارهای متفاوت مورد نظر شاخص ADI را در منطقه به‌عنوان شاخص برتر معرفی کردند. تاکنون شاخص‌های مختلفی برای تعیین ویژگی دوره‌های خشکسالی ارائه شده است، برخی از این شاخص‌ها شامل DI، EDI،ZSI، PNI و SPI و برپایه متغیر بارندگی می‌باشند. انصافی‌مقدم (۱۳۸۶) چند شاخص خشکسالی اقلیمی را ارزیابی کرد و شاخص مناسب در حوضه دریاچه نمک تعیین کرد، همچنین نشان داد شاخص SPI کارایی بهتری نسبت به شاخص ZSI دارد. Mostafavi Darani و همکاران (۲۰۱۱) با مقایسه RDI و SPI در ده ایستگاه سینوپتیک استان اصفهان در دوره آماری ۱۳ ساله دریافتند که تفاوت معنی‌داری بین این دو شاخص (در دوره زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه) وجود ندارد. خلیلی‌اقدم و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از شاخص بارش (SPI) در ایستگاه سینوپتیک ارومیه دریافتند در طول دوره آماری تحقیق در هر یک از دوره بازگشت‌های ۲۲گانه خشکسالی شدید رخ داده است.

سرحدی و همکاران (۱۳۸۸) به‌منظور برآورد گستره تحت تأثیر خشکسالی در استان اصفهان، بارندگی سالانه ۱۲ ایستگاه مهم این استان شامل مراکز شهرستان‌ها در دوره آماری ۱۹۷۳-۲۰۰۳ را بررسی کردند. در آغاز با بهره‌گیری از آزمون روند و همگنی روند معنی‌داری ایستگاه اصفهان مشخص شد.. سپس وضعیت خشکسالی در هر سال با بهره‌گیری از چهار شاخص RAI،DPI،PNPI و SPI محاسبه شد. نتایج این بررسی نشان داد بر پایه چهار شاخص مذکور، خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای به‌صورت میانگین به‌ترتیب ۲۳، ۳۷، ۳۱ و ۵۲ درصد منطقه را فرا می‌گیرد. این بررسی نشان داد از بین شاخص‌های مختلف، شاخص DPI که نشان دهنده وضعیت خشکسالی می‌باشد با طول جغرافیایی رابطه دارد. به عبارت دیگر خشکسالی با افزایش طول جغرافیایی و حرکت به‌سمت شرق استان با تناوب و شدت بیشتر رخ می‌دهد. درحالی‌که در شاخص‌های دیگر این رابطه‌وجود ندارد. همچنین باتوجه‌به شاخص SPI به‌عنوان مهم‌ترین شاخص، در دوره آماری ۳۰ ساله به‌صورت میانگین همواره نیمی از استان اصفهان در معرض خشکسالی قرار داشته است. این موضوع اهمیت ایجاد یک نظام پایش و مدیریت منطقه‌ای را به‌منظور کاهش آثار خشکسالی نمایان می‌سازد.

در این مطالعه باتوجه‌به اهمیت پدیده خشکسالی و مطالعه آن عملکرد شاخص‌های خشکسالی DI، PDSI، PNPI، SWSI، SPI، CMI، RDI و RAI بررسی و نقاط ضعف و قوت هر کدام از شاخص‌ها ارزیابی شدند.

معرفی برخی شاخص‌های خشکسالی

۱- شاخص دهک‌ها (DI)

این شاخص توسط GibbsوMaher (۱۹۶۷) به‌منظور رفع نواقص موجود در روش درصد از نرمال ارائه شده است. این روش بر مبنای کاربرد توزیع فراوانی تجمعی یک ایستگاه بنا شده و توسط محققین استرالیایی استفاده می‌شود. شاخص DI وقوع بارندگی‌های طولانی‌مدت را در دهم‌هایی از توزیع نرمال تقسیم کرده که هر یک از این گروه‌ها را یک دهک می‌نامند. تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص بارش می‌باشد و مقیاس زمانی که در این شاخص استفاده شده است نیز مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه می‌باشد. اصول کلی محاسبه شاخص دهک‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

داده‌های بارندگی ماهانه و یا سالانه پس از مرتب‌سازی صعودی احتمال وقوع بارش از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$Pi=i/(N+1)\times 100 \qquad (1)$$

که در آن، Pi احتمال وقوع بارندگی در شماره ردیف i ام و N تعداد داده‌های بارندگی می‌باشد.

پس از محاسبه مقدار مشخص Pi در فاصله دهک (فاصله ۱۰درصدی) مشخص، یکی از درجه‌های خشکی به آن نسبت داده

می‌شود. بنابراین اولین دهک مقدار بارندگی است که از کمترین ۱۰ درصدی تجاوز نمی‌کند. همچنین دومین دهک مقدار بارندگی است که از کمترین ۲۰ درصد کل تجاوز نکرده است. دهک پنجم یا میانه مقدار بارشی است که از ۵۰ درصد رخدادها تجاوز نمی‌کند. از مزایای این شاخص ایجاد اطلاعات دقیق از بارش برای پاسخ به خشکسالی می‌باشد. بااین‌حال، استفاده از آن مستلزم ثبت اطلاعات علمی بلندمدت برای محاسبه دقیق شاخص می‌باشد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص دهک‌ها (DI)

ردیف	درصد وقوع	وضعیت خشکسالی	شماره دهک
۱	کمتر از ۱۰	خشکسالی خیلی شدید	اول
۲	۱۰ تا ۲۰	خشکسالی شدید	دوم
۳	۲۰ تا ۳۰	خشکسالی	سوم
۴	۳۰ تا ۴۰	تقریباًنرمال	چهارم
۵	۴۰ تا ۵۰	نرمال	پنجم
۶	۵۰ تا ۶۰	کمی نرمال	ششم
۷	۶۰ تا ۷۰	کمی مرطوب	هفتم
۸	۷۰ تا ۸۰	مرطوب	هشتم
۹	۸۰ تا ۹۰	بسیار مرطوب	نهم
۱۰	بیشتر از ۱۰۰	فوق‌العاده مرطوب	دهم

۲- شاخص درصد نرمال بارش (PNPI)

یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که برای ارزیابی خشکسالی استفاده می‌شود و از تقسیم میزان بارندگی رخ داده بر مقدار بارندگی نرمال به‌دست‌آمده و مقدار آن بر حسب درصد بیان می‌شود. یکی از مزیت‌های این شاخص درصد طبیعی در یک منطقه یا فصل مؤثر است. در این شاخص درصد نرمال نمی‌تواند فرکانس خروج از حالت طبیعی یا با مکان‌های مختلف را مقایسه کند. همچنین این شاخص نمی‌تواند تأثیرات خاصی از خشکسالی، عامل مهار یا برنامه‌ریزی کاهش خطر خشکسالی را تعیین کند (Willeke و همکاران، ۱۹۹۴).

معادله این شاخص در رابطه (۲) ذکر شده است:

$$PN = \frac{P}{\overline{P}} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن، P مجموع بارندگی در سال مفروض (میلی‌متر) و $\overline{P}$ میانگین بارش درازمدت (میلی‌متر) می‌باشد.

جدول ۲- طبقات مختلف شاخص PNPI

ردیف	وضعیت خشکسالی	عدد شاخص (درصد)
۱	خشکسالی ضعیف	۷۰ تا ۸۰
۲	خشکسالی متوسط	۵۵ تا ۷۰
۳	خشکسالی شدید	۴۰ تا ۵۵
۴	خشکسالی بسیار شدید	کمتر از ۴۰

۳- شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)

این شاخص یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه خشکسالی از طریق محاسبه بیلان آبی است که توسط Palmer (۱۹۶۵) ارائه شد و به‌صورت گسترده در آمریکا و سایر کشورها استفاده شده است. برای استفاده از این شاخص باید تحلیل‌های آب‌وهوایی دراز مدت به‌منظور محاسبه پنج ثبات یا ضریبی که ویژگی‌های رطوبتی ویژه‌ای از آب‌وهوای منطقه را تعریف می‌کند، انجام گیرد. در ابتدا این شاخص نیازمند مطالعه بیلان آبی ماهانه درازمدت می‌باشد. شاخص پالمر مدل دو لایه‌ای خاک را به‌کار گرفته و از طریق شاخص تورنت وایت میزان تبخیرتعرق را محاسبه می‌نماید. بااین‌حال شاخص مذکور روش خاصی را برای محاسبه تبخیرتعرق بالقوه نیاز ندارد. نتایج تحلیل‌های دراز مدت بیانگر تغییرات شاخص مذکور در دامنه ۴- تا ۴+ می‌باشد. ارزش صفر در این شاخص بیانگر شرایط طبیعی منطقه بوده که در طی زمان ارزش مزبور می‌تواند ناهنجاری‌های مثبت (حالت سیلابی یا پربارانی) و ناهنجاری‌های منفی (خشکسالی) داشته باشد. PDSI برای کاستن از خشکسالی‌های کشاورزی و به‌صورت گسترده استفاده شود. PDSI جهت شناسایی عوارض خشکسالی در یک منطقه و نشان دادن جنبه‌های تاریخی شرایط فعلی مناسب است. به این دلیل که داده‌ها به رطوبت خاک و خواص آن بستگی دارند، شاخص PDSI تشخیص خشکسالی طی چند ماه ممکن است به تعویق بیفتد. نتایج حاصل از این شاخص در فصول زمستان و بهار به علت وجود اثرات زمین یخ‌زده و برف چندان دقیق نیست و به کم کردن رواناب تمایل دارد.

جدول ۳ - شدت خشکسالی براساس شاخص پالمر (PDSI)

ردیف	عدد شاخص	وضعیت هوا
۱	۴ یا بیشتر	بسیار مرطوب تر از نرمال
۲	۳ تا ۳/۹۹	خیلی مرطوب تر از نرمال
۳	۲ تا ۲/۹۹	نسبتا مرطوب تر از نرمال
۴	۱ تا ۱/۹۹	کمی مرطوب تر از نرمال
۵	۰/۵ تا ۰/۹۹	ناحیه مرطوب
۶	۰/۴۹+ تا ۰/۴۹-	تقریباًنرمال
۷	۰/۵- تا ۰/۹۹-	ابتدای خشکسالی
۸	۱- تا ۱/۹۹-	خشکسالی ملایم
۹	۲- تا ۲/۹۹-	خشکسالی متوسط
۱۰	۳- تا ۳/۹۹-	خشکسالی شدید
۱۱	۴- و کمتر	خشکسالی بسیار شدید

۴- شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI)

این شاخص را Dezman و Shafer (۱۹۸۲) به‌منظور تکمیل فهرست پالمر برای شرایط رطوبتی اراضی ایالت کلرادو تهیه نمود. این پارامتر به‌عنوان شاخصی برای شرایط آب‌های سطحی طراحی شده و از

آن‌جایی‌که مقدار برف کوهستان‌ها در آن مؤلفه مهمی به‌شمار می‌رود، به‌عنوان شاخص مبتنی بر شرایط کوهستان توصیف شده است. در شاخص تأمین آب سطحی چهار مؤلفه هیدرولوژیکی به‌کار رفته است که عبارتند از: پوشش برفی، بارش، جریان رود و ذخیره رطوبتی خاک. SWSI برای نشان دادن شرایط ذخیره برف در مناطق کوهستانی و اندازه‌گیری آب عرضه شده بسیار کارآمد است. بااین‌وجود در این شاخص حوضه‌های مختلف را نمی‌توان با یکدیگر مقایسه کرد و این شاخص به‌صورت فصلی محاسبه شده است.

رابطه (۳) شاخص ذخیره آب سطحی را نشان می‌دهد:

$$SWSI = \frac{aP_{snow} + bP_{prec} + cP_{strm} + dP_{resv} - 50}{12} \qquad (۳)$$

که در آن a، b، c، d وزن هر یک از مؤلفه‌های هیدرولوژیک، P احتمال عدم وقوع برای مؤلفه‌ها برحسب (درصد)، Snow پوشش برف، Prec بارش (میلی‌متر)، Strm جریان رود و resv ذخیره رطوبتی خاک می‌باشد. دامنه تغییرات این شاخص از ۴/۲- تا ۴/۲+ بوده و محاسبه این شاخص برای هر حوضه باتوجه‌به خصوصیات آن حوضه صورت می‌گیرد.

جدول ۴- طبقه‌بندی شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI)

ردیف	تغییرات‌رطوبت	عدد معرف شاخص
۱	مرطوب بسیار شدید	بالای ۴
۲	مرطوب شدید	۳ تا ۴
۳	مرطوب متوسط	۲ تا ۲/۹۹
۴	مرطوب ضعیف	۱ تا ۱/۹۹
۵	نزدیک نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹+
۶	خشکسالی ضعیف	۱/۹۹- تا ۱-
۷	خشکسالی متوسط	۲/۹۹- تا ۲-
۸	خشکسالی شدید	۳- تا ۴-
۹	خشکسالی بسیار شدید	بالای ۴-

۵- شاخص بارندگی استاندارد (SPI)

یکی از روش‌های تعیین خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده است که توسط Mackee و همکاران (۱۹۹۳) و با هدف پایش خشکسالی در ایالت کلرادو ارائه شد. این شاخص به‌دلیل سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب‌وهوایی به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص شناخته می‌شود. شاخص مذکور برای محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۱، ۳ و ۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ماهه) و بر مبنای داده‌های بارش که همبستگی بالایی نسبت به هم دارند استوار است. SPI کوتاه‌مدت، شرایط رطوبت خاک را منعکس می‌کند و برآورد فصلی از بارندگی را مشخص می‌سازد. در این مدل، تغییرات بیشتری وجود دارد و نشانگر آن است که شاخص SPI کوتاه‌مدت، حساسیت بیشتری به تغییرات شرایط رطوبت دارد. SPI طولانی‌مدت، خشکسالی را بهتر منعکس می‌کند و مقادیر به‌دست‌آمده برای این مقیاس زمانی با سیل‌ها، سطح آب در سطح‌ها و منابع آب زیرزمینی مرتبط است. مناسب‌ترین تابع توزیع احتمال برای برازش داده‌های بارندگی ماهانه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک توابع گاما می‌باشد. به‌منظور تفسیر و بررسی نتایج حاصل از این محاسبه جدولی ارائه شده که در آن مقادیر مثبت نشان‌دهنده بارندگی بیش از بارش متوسط و مقادیر منفی عکس آن است. طبق این روش، خشکسالی زمانی روی می‌دهد که SPI به‌طور مستمر منفی و به ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مثبت شود. مدت دوره خشکسالی با شروع و خاتمه ارقام منفی آن تعیین می‌شود و مقادیر تجمعی SPI نیز بزرگی و شدت دوره خشکسالی را نشان می‌دهد. از مزایای این شاخص توانایی ارائه SPI در هشدار اولیه در مورد خشکسالی و شدت آن می‌باشد. از این شاخص برای هر مکانی می‌توان استفاده نمود. همچنین برای مدیریت خطر شاخص مناسبی می‌باشد. از معایب این شاخص، مدت زمان طولانی تا ۲۴ ماه می‌باشد که مقادیر حاصل چندان قابل اعتماد نیست. Zehtabian و همکاران (۲۰۱۳) با تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای ارتباط SPI و RDI در خراسان جنوبی، براساس داده‌های شش ایستگاه سینوپتیک این استان در طی دوره ۲۲ ساله (۲۰۱۱ -۱۹۹۰) به این نتیجه رسیدند که بر اساس شاخص SPI خشکسالی شدید در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ در منطقه حاکم بوده است.

شاخص SPI با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\mathbf{SPI} = \frac{\mathrm{Pi} - \overline{\mathrm{P}}}{\mathrm{S}} \qquad (۴)$$

که در آن، P_i مقدار بارش در دوره مد نظر، $\overline{P}$ میانگین درازمدت بارش در دوره مورد نظر و S انحراف معیار مقادیر بارش در دوره مورد نظر می‌باشد. البته باید توجه شود که SPI توزیع نرمال را برای بارش در نظر می‌گیرد. چون بارندگی اغلب از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند، لذا باید قانون احتمالی حاکم بر آن را پس از مشخص‌کردن به نرمال استاندارد تبدیل کرد (Mackee و همکاران، ۱۹۹۳).

جدول ۵- طبقه‌بندی شاخص خشکسالی SPI

ردیف	وضعیت	SPI
۱	فرا مرطوب	≥۲
۲	بسیار مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
۳	نسبتاًمرطوب	۱ تا ۱/۴۹
۴	نزدیک نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
۵	نسبتاًخشک	۱- تا ۱/۴۹-
۶	بسیار خشک	۱/۵- تا ۱/۹۹-
۷	فرا خشک	≤۲-

۶- شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI)

شاخص ناهنجاری بارندگی را Van-Rooy (۱۹۶۵) ارائه کرده است و اساس آن محاسبه انحراف میزان بارندگی از مقدار نرمال می‌باشد. این شاخص قابلیت مقایسه مناطق مختلف از نظر شدت خشکسالی (به‌ویژه در ماه‌های پرباران) را دارد. در ایستگاه‌های مناطق خشك (مانند یزد) به‌دلیل عدم وقوع بارندگی در تعداد زیادی از سال‌های یك دوره آماری، امکان مقایسه سال‌های آماری از نظر شدت خشکسالی در یك ماه معین (به‌خصوص ماه‌های کم باران سال) وجود ندارد. تنها عامل مؤثر در محاسبه این شاخص بارش می‌باشد. این شاخص در دو مقیاس زمانی ماهانه و سالانه به‌کار برده می‌شود.

شاخص فوق بر اساس روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شود:

که در آن محاسبه میانگین دراز مدت بارندگی در ایستگاه‌های مورد نظر ($\overline{P}$)، استخراج میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده در دوره‌های مطالعاتی ($\overline{m}$)، استخراج میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده در دوره مطالعاتی ($\overline{X}$)، مقایسه داده‌های بارندگی P یا میانگین درازمدت بارندگی.

اگر $P > \overline{P}$ یا ناهنجاری مثبت باشد، شاخص ناهنجاری بارندگی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$RAI = 3\left[\frac{P-\overline{P}}{\overline{m}-\overline{P}}\right] \quad (۵)$$

اگر $P < \overline{P}$ یا ناهنجاری منفی باشد، شاخص ناهنجاری بارندگی با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$RAI = -3\left[\frac{P-\overline{P}}{\overline{X}-\overline{P}}\right] \quad (۶)$$

که در آن، P بارندگی واقعی، $\overline{P}$ بارش میانگین و $\overline{X}$ میانگین ۱۰ مورد از شدیدترین ناهنجاری‌های مثبت و منفی به‌دست‌آمده از شاخص ناهنجاری بارش می‌باشد. نسبت داده آستانه‌های ۳+ و ۳- به‌ترتیب به میانگین ده مورد از شدیدترین ناهنجاری‌های مثبت و منفی به‌دست‌آمده از شاخص ناهنجاری بارندگی می‌باشد. با مقیاس‌گذاری روی مقادیر حاصل از شاخص ناهنجاری بارندگی، نه طبقه ناهنجاری با دامنه‌ای از شرایط رطوبت بسیار شدید تا خشکسالی بسیار شدید تعیین می‌شود. طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص RAI در جدول (۶) آمده است.

جدول ۶ - طبقه بندی خشکسالی بر اساس شاخص RAI

ردیف	وضعیت‌خشکسالی	آستانه‌های‌نسبت داده شده به RAI
۱	نزدیک نرمال	۰/۳- تا ۰/۳+
۲	خشکسالی‌ضعیف	۱/۲- تا ۰/۳-
۳	خشکسالی‌متوسط	۲/۱- تا ۱/۲-
۴	خشکسالی‌شدید	۳- تا ۲/۱-
۵	خشکسالی‌بسیار شدید	۳- ≤

۷- شاخص رطوبت زراعی (CMI)

شاخص CMI روشی است که وضعیت رطوبتی گیاهان زراعی را به‌صورت هفتگی بررسی می‌کند. Palmer در ۱۹۶۸ این شاخص را ارائه نمود. اهمیت نسبی آب در تولیدات کشاورزی بر حسب شرایط اقلیمی و جغرافیایی تغییر می‌کند و به‌طورکلی به‌مقدار و توزیع زمانی نزولات بستگی دارد. در این روش از راهبردهای هواشناسی جهت پایش هفته به هفته شرایط محصولات زراعی استفاده می‌شود و به کمک آن تغییرات کوتاه‌مدت شرایط رطوبت در مناطق عمده کشت برآورد می‌شود. شاخص CMI با تغییر مکان و زمان دارای ضرایب وزنی است و به تغییر شرایط، سریع پاسخ می‌دهد. اساس این شاخص بر پایه محاسبات شاخص پالمر (PDSI) بود. شاخص CMI برای شناسایی خشکسالی کوتاه‌مدت کشاورزی موثر است و برای نظارت بر شرایط محصول استفاده می‌شود. لازم به ذکر است چون این شاخص فقط برای محاسبه شرایط رطوبتی دوره رشد محصول طراحی شده است، نمی‌تواند در خارج از فصل رشد گیاه کاربرد داشته باشد. همچنین اگر منطقه‌ای با شرایط خشکسالی چندین ساله مواجه باشد این شاخص قابلیت استفاده نخواهد داشت. درحالی‌که شاخص پالمر براساس محاسبات طولانی خشکی و رطوبت پایه‌گذاری شده است که در واقع تفاوت‌های اساسی این شاخص با شرایط ذکر شده مشخص می‌شود. شاخص رطوبت محصول براساس میانگین حرارت و بارش کلی برای هر هفته در یک ناحیه اقلیمی خاص استفاده شده و سعی بر این است که جهت بررسی شرایط رطوبتی در هفته، از محاسبات انجام شده در هفته‌های قبلی استفاده شود. این شاخص به تغییرات شرایط رطوبتی پاسخ می‌دهد. در واقع اساس محاسبات CMI به‌صورت هفتگی بوده و شرایط رطوبت را در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

در محاسبه CMI از متغیرهای زیر استفاده می‌شود:

AWC ظرفیت موجود نگهداری آب، PEیا تبخیر بالقوه که براساس محاسبات انجام شده با روش تورنت وایت محاسبه می‌شود، ET تبخیرتعرق واقعی، Alpha ضریب تبخیرتعرق، CET شرایط آب و هوایی برای ایجاد تبخیرتعرق، R محاسبه کلی تخلیه، RO محاسبه کلی رواناب، Ss مقدار رطوبتی سطح بالایی خاک، S مقدار رطوبتی لایه پایینی خاک، M درصد ظرفیت اشباع، DE نسبت آنومالی تبخیر برای هر هفته، I`Y اولین تخمین برای Y در طول هفته iام، Yi شاخص کسری موازنه تبخیرتعرق در طول هفته iام، H شرایط برگشت به دوره نرمال رطوبتی و CMI شرایط رطوبتی.

بعد از محاسبه تمام مقادیر واقعی و بالقوه متغیرهای ذکر شده، شاخص CMI به‌دست خواهد آمد. این محاسبات این امکان را می‌دهد که طبقات شدت خشکسالی از نظر این شاخص برای محصول مورد نظر محاسبه شود.

جدول ۷ – طبقه‌بندی درجه شاخص رطوبت محصول (CMI)

ردیف	وضعیت‌خشکسالی	عدد خشکسالی
۱	خیلی زیاد	< -۳
۲	زیاد	-۲/۹ تا -۲
۳	تقریباً خشک	-۱/۹ تا -۱
۴	خیلی کم خشک تا کم مرطوب	۰/۹ تا -۰/۹
۵	تقریباً مرطوب	۱/۵ تا ۱
۶	مرطوب	۲/۵ تا ۲
۷	خیلی‌مرطوب	> ۳

۸- شاخص خشکسالی احیایی (RDI)

این شاخص از نوع شاخص‌های خشکسالی هواشناسی می‌باشد که بر پایه تبخیرتعرق پتانسیل و بارش استوار است. این شاخص برای اولین بار در منطقه مدیترانه تحت پروژه‌ای با عنوان MEDROPLAN توسط Tsakiris و همکاران (۲۰۰۴) به‌صورت آزمایشی استفاده شد. شاخص RDI به‌عنوان ماشینی برای ارزیابی برنامه‌های بازسازی خشکسالی استفاده می‌شود که از مزایای این شاخص می‌باشد. از طرفی در این شاخص مانند شاخص SWSI حوضه‌های مختلف را نمی‌توان با یکدیگر مقایسه کرد. جهت محاسبه این شاخص نخست با استفاده از نسبت بارندگی (P) به تبخیرتعرق پتانسیل (PET) مقادیر اولیه a_0^i برای هر بازه زمانی دلخواه یا سال‌های مختلف بر اساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\boldsymbol{a_0^i} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{i,j}} \quad , i = 1,2,\dots\dots,N \quad , j = 1,2,\dots\dots,12 \qquad (۷)$$

در این رابطه بارندگی $P_{i,j}$ و $PET_{i,j}$ به‌ترتیب مقادیر باران و تبخیرتعرق پتانسیل ماه iام از سال iام و N برابر تعداد سال‌های آماری است. روش پیشنهادی محاسبه تبخیرتعرق، روش تورنت وایت (Maeda و همکاران، ۲۰۱۰) است. مرحله دوم در محاسبه این شاخص، مقادیر RDI نرمال شده (RDI_n) با استفاده از مقادیر a_0^i محاسبه شده برای سال‌های مختلف در گام قبلی، مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\boldsymbol{RDI_n^i} = \frac{a_0^i}{\overline{a_0}} - 1 \qquad (۸)$$

در این رابطه $\overline{a_0}$ میانگین حسابی مقادیر a_0^i در سال‌هایی می‌باشد که در مطالعه استفاده می‌شود که برابر با نسبت شاخص خشکسالی ارائه شده از سوی سازمان فائو است. مرحله سوم در محاسبه این شاخص مقادیر استاندارد شده (RDI_s) است که بسیار شبیه به محاسبه شاخص SPI می‌باشد. با فرض اینکه مقادیر a_0^i از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کنند. استفاده از مقادیر a_0^i سال‌های مختلف با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شوند.

$$\boldsymbol{RDI_s^i} = \frac{y_i - \overline{y}}{\widehat{\sigma}\, y} \qquad (۹)$$

که در آن، y_i برابر است با $\ln a_0^i$ و $\overline{y}$ و $\widehat{\sigma}\, y$ به‌ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر y_i است.

در روابط مذکور a_0 از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند. لازم به ذکر است که انتخاب توزیع فراوانی برای a_0 محدود به لوگ نرمال نمی‌شود اما برای کمک به پایه‌گذاری یک روش واحد به‌جای چند روش از توزیع لوگ نرمال استفاده می‌شود.

جدول ۸ - ارزیابی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص RDI_{st}

ردیف	وضعیت‌خشکسالی	شاخص RDI_{st}
۱	ترسالی بسیار شدید	≥۲
۲	ترسالی شدید	۱/۹۹ تا ۱/۵
۳	ترسالی‌متوسط	۱/۴۹ تا ۱
۴	نزدیک به نرمال	۰/۹۹ تا -۰/۹۹
۵	خشکسالی‌متوسط	-۱/۴۹ تا -۱
۶	خشکسالی‌شدید	-۱/۹۹ تا -۱/۵
۷	خشکسالی‌بسیار شدید	≤-۲

جمع‌بندی

باتوجه‌به اهمیت خشکسالی، در تحقیق حاضر شاخص‌های مختلف برآورد خشکسالی بررسی شد. بررسی و ارزیابی شاخص‌ها نشان داد که شاخص دهک‌ها از تعداد رخدادهای توزیع شده از ۱ تا ۱۰ محاسبه می‌شود. کمترین مقدار شرایط خشکی را نسبت به حالت طبیعی نشان می‌دهد و مقدار بالاتر نشان‌دهنده شرایط مرطوب‌تر از حد نرمال است. عیب اساسی شاخص دهک‌ها نیاز به داده‌های طولانی مدت (حداقل۳۰ ساله) برای محاسبه می‌باشد، بنابراین برای مکان‌هایی که به تازگی ایستگاه باران‌سنجی در آن‌ها نصب شده است محاسبه انجام نخواهد گرفت. شاخص PDSI از داده‌های بارش، دما و رطوبت خاک محاسبه می‌شود. داده‌های رطوبت خاک، به منطقه آب‌وهوایی همگن کالیبره شده است. این شاخص دارای یک جدول زمانی ذاتی ۹ ماه است و هر نوع بارش را به‌عنوان باران در نظر می‌گیرد. شاخص مذکور یک روش ساده برای تشخیص خشکسالی است. در این شاخص متوسط یا میانگین بارش با میانه یکی نبوده و ارزش آن از ۵۰ درصد بارش اتفاق افتاده انحراف دارد که از معایب شاخص PDSI می‌باشد. به‌این دلیل درصد بارش نرمال به آسانی گمراه‌کننده و غیرواقعی می‌باشد و شرایط مختلفی را باتوجه‌به منطقه و فصل عرضه می‌کند. شاخص SWSI برای تجزیه و تحلیل فرکانس جهت به‌کارگیری داده‌های بلندمدت مانند بارش، برف، جریان و سطح مخزن استفاده می‌شود. شاخص SPI نیز یک شاخص ساده است که از ثبت طولانی‌مدت بارش در هر مکان (حداقل ۳۰ سال) محاسبه می‌شود. داده‌ها به توزیع نرمال متصل

می‌شوند و در مقیاس زمانی چندگانه مانند ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ و غیره نرمال می‌شوند. این شاخص برای توصیف خشکسالی فقط به پارامتر بارندگی احتیاج دارد و اثر خشکسالی بر روی منابع آبی و ذخایر آب زیرزمینی، رطوبت خاک و رژیم رودخانه‌ها را به خوبی منعکس می‌کند. تغییرپذیری SPI باعث می‌شود در مقیاس‌های کوتاه‌مدت برای اهداف کشاورزی و در مقیاس‌های بلندمدت برای اهداف هیدرولوژی مثل منابع آب زیرزمینی، جریان‌های رودخانه‌ای، سطح دریاچه‌ها و منابع سطحی استفاده شود. به این دلیل، این شاخص کاربرد گسترده‌ای در مطالعات خشکسالی داشته و پذیرش جهانی نیز دارد. شاخص CMI مشتق PDSI است که از روش‌های محاسبه رطوبت به‌عنوان تابعی از ناهنجاری‌های تبخیر و انتقال و غلظت رطوبت در خاک توسعه داده شده است. شاخص RDI با شاخص SWSI شباهت دارد. این شاخص توابع عرضه، تقاضا و مدت زمان را ترکیب می‌کند. RDI همچنین ویژگی‌های دما و مدت زمان را نیز در شاخص ترکیب می‌کند. شاخص RAI قادر است خشکسالی را در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت (۱ ماهه تا ۴۸ ماهه) پایش نماید. همچنین باتوجه‌به اینکه جهت استفاده از این شاخص داده‌هایی محدودی مورد نیاز است حساسیت بالا و انعطاف‌پذیری زیاد کاربرد آن در حال افزایش است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که از بین شاخص‌های مورد مطالعه، شاخص SPI دارای مزیت نسبی بالایی برای پایش خشکسالی می‌باشد. شاخص RDI باتوجه‌به این‌که بر مبنای بارندگی و تبخیرتعرق پتانسیل محاسبه می‌شود نسبت به شاخص SPI که تنها بر مبنای بارندگی محاسبه می‌شود به متغیرها و تغییرات آب‌وهوایی حساسیت بیشتری دارد. از این‌رو شاخص RDI مقایسه منطقی از وضعیت خشکسالی را در مناطق با آب‌وهوای متفاوت نشان می‌دهد. شاخص CMI محدود به استفاده در فصل رشد است و نمی‌تواند مدت زمان طولانی خشکسالی را تعیین کند. بنابراین در صورت استفاده از این شاخص برای دوره طولانی اطلاعات به‌دست‌آمده از این شاخص فاقد اعتبار خواهد بود. شاخص PNPI روشی ناکارآمد برای ارزیابی خشکسالی بوده و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از این شاخص خطاهای زیادی خواهد داشت.

جدول ۹- مقایسه شاخص‌های خشکسالی

نام شاخص	نوع خشکسالی	داده‌های مورد نیاز	نقاط قوت	نقاط ضعف	مقیاس
شاخص دهک‌ها (DI)	هواشناسی	بارش	ایجاد اطلاعات دقیق از بارش برای پاسخ خشکسالی	به دلیل نیاز به داده‌های طولانی مدت در مکان‌هایی که به تازگی ایستگاه تأسیس شده قابل استفاده نیست.	ماهانه سالانه
شاخص درصد نرمال بارش (PNPI)	هواشناسی	بارش	سادگی، مفید برای بیان اولیه خشکسالی	بارندگی‌های ماهانه و فصلی از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند.	ماهانه سالانه
شاخص شدت خشکسالی‌پالمر (PDSI)	کشاورزی	بارش، دما و محتوی آب قابل دسترس (AWC)	تحلیل وضعیت خشکسالی در گستره‌های زمانی و مکانی	عدم لحاظ برف، پوشش برفی و زمین یخ زده، در نظر نگرفتن تأخیر زمانی بین لحظه بارندگی و وقوع رواناب نیاز به داده‌های روزانه	ماهانه سالانه
شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI)	هیدرولوژیکی	برف، بارش، جریان رودخانه‌ای و ذخیره مخازن	ارزیابی شدت خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از برف پشته و سطوح آب سطحی	عدم لحاظ عناصر دیگر چرخه هیدرولوژیکی، مثل تبخیر و ظرفیت رطوبت خاک، عدم مقایسه حوضه‌ها با یکدیگر	فصلی
شاخص بارندگی استاندارد (SPI)	هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی	بارش	نسبتاً ساده و عملاً قابل استفاده برای تمام شرایط منابع آبی و برای مقیاس‌های زمانی متعدد	از معایب این شاخص، مدت زمان طولانی تا ۲۴ ماه است که مقادیر حاصل چندان قابل اعتماد نیست	ماهانه فصلی سالانه
شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI)	هواشناسی	بارش	مقایسه مناطق مختلف از نظر شدت خشکسالی	در ایستگاه‌های مناطق خشک امکان مقایسه سال‌های آماری از نظر شدت خشکسالی در یك ماه معین وجود ندارد.	ماهانه سالانه
شاخص رطوبت زراعی (CMI)	کشاورزی	دما و بارش	ارزیابی خشکسالی‌های طولانی مدت	محدود به استفاده در فصل رشد	فصلی
شاخص خشکسالی احیایی (RDI)	هیدرولوژیکی	سطح آب رودخانه، بارش برف، جریانات سطحی، ذخایر آب و دما	توجه به میزان آب و عوامل اقلیمی و کاربرد برای ارزیابی برنامه‌های بازسازی خشکسالی	عدم مقایسه حوضه‌ها با یکدیگر	ماهانه سالانه

منابع

انصافی‌مقدم، ط. ۱۳۸۶. ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک. مجله تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۴(۲): ۲۷۷-۲۸۱

ایران‌صالحوند، م.م. و مومنی، م. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های (DI, ZCI , PNI , SPI, SPI) و دنباله‌ها در شهرهای خوزستان در محیط GIS. فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری چشم‌انداز زاگرس، ۵۲(۳): ۳۵-۳۷.

حسنی‌ها، ح. و صالحی، ز. ۱۳۷۹. بررسی وضعیت خشکسالی براساس تعدادی از شاخص‌های آماری در استان زنجان. مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی مقابله با کم آبی و خشکسالی. دانشگاه شهید باهنرکرمان، ۱: ۱۷-۲۷.

خلیلی‌اقدم، ن.، مساعدی، الف. و لطیفی، ن. ۱۳۸۶. بررسی خشکسالی و روند وقوع آن در ارومیه. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۵): ۱۴۶-۱۵۶.

سرحدی، ع.، سلطانی، س. و مدرس، ر. ۱۳۸۸. ارزیابی و تحلیل گستره خشکسالی در استان اصفهان بر پایه چهار شاخص مهم خشکسالی. مجله منابع طبیعی ایران، ۶۱(۴): ۵۷۰-۵۷۵.

Barua S., Ng A.W.M. and Perera B.J.C. 2011. Comparative Evaluation of Drought Indices: A Case Study on The Yarra River Catchmentin Australia. Journal of Water ResourcesPlanning and Management, 137(2): 215-226.

Bordi I. and Sutera A. 2004. Drought variability and its climatic implications. Global and Planetary Change, 40(2): 115-127.

Gibbs W.J. and Maher J.V. 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bureau of Meteorology.

Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia, 48: 84Pages.

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

Mackee B.T., Nolan Dooesken J. and Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple timescales. 9thConference on Applied Climatology. 15-20. January, Boston, Massachusetts.

MacKee T.B., Doesken N.J. and 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.

Maeda E.E., Wiberg D.A. and Pellikka P.K.E. 2010. Estimating refrence evapotranspiration using sensing empirical models in a region with limited data availability in Kenya. Applied Geography, 31(1): 251-258.

Meyer S.J. and Hubbard K.G. 1995. Extending the crop-specific drought index to soybean. 9th Conference on Applied Climatology. Dallas, TX. Meteorol. Soc., Boston.

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

Mostafavi Darani S.M., Khoshhal Dastjerdi J., Parandeh A. and Ghatrehsamani M. 2011. Drought monitoring in Esfahan province (IRAN) by comparison of Standard Precipitation Index (SPI) & econnaissance DroughtIndex(RDI). EMS Annual Meeting Abstracts, 8: 211-229.

NDMC. 2006. What is drought?, National Climatic Data Center. <http://www.drought.unl.edu/whatis> (accessed 22 April 2011).

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

Palmer W.C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. Weatherwise, 21(4): 156–161.

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

Shafer B. and 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 Conference. (p. 164–175)

Smakhtin V.U. and hughes D.A. 2004. Review, Automated Estimation and Analyses of Drought Indices in south Asia. International Wter Management Institute. Colombo, Sri Lanka..

Tallaksen L.M. and Van Lanen H.A.J. 2004 Hydrological drought. Processes and estimation methods

The Drought Phenomenon, The Role of Definitions. Water International, 10(3): 111-120.

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

Zehtabian G.h., Karimi K., Nakhee Nejadfard S., Mirdashtvand M. and Khosravi H. 2013. ComparabilityAnalyses of the SPI and RDIMeteorological Drought Indices in South Khorasan province in Iran. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 1(9): 981-992.

for streamflow and groundwater. Volume 48. Development in Water Science. Elsevier Science B.V., Amsterdam, the Netherlands. 48:

Tsakiris G., Pangalou D. and Vangelis H. 2004. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resource Manage, 21(5): 821–833.

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

Van-Rooy M.P. 1965. A Rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. Notos, 14: 43-48.

Wilhite D.A. and Glantz M.H. 1985. Understanding