شاخص‌های برآورد و ارزیابی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک

محمد پورالخاص نوکنده‌یی[١]، ویدا امان‌جهانی[٢]، زینب حزباوی[٣]، رئوف مصطفی‌زاده[٤*]

١- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

٢- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

٣- استادیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

٤*- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

ایمیل نویسنده مسئول: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

تاریخ دریافت:١٤٠١/٠٤/٣٠ تاریخ پذیرش:١٤٠١/٠٦/٠٢

چکیده

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی است که نتایج و اثرات آن بر حوزه‌های اجتماعی، اقتصادی، منابع آب و کشاورزی می‌تواند به‌صورت قابل توجهی آشکار شود. اگرچه وقوع خشکسالی اجتناب‌ناپذیر است، اما می‌توان با پیش‌بینی نسبت به کاهش اثرات مخرب آن بر اقتصاد، اجتماع و محیط زیست برنامه‌ریزی نمود. هدف این تحقیق تبیین انواع خشکسالی‌ها و معرفی شاخص‌های مهم و پرکاربرد در ارزیابی و کمی‌نمودن خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی است. ضمن معرفی مزایا، محدودیت‌ها و دامنه طبقات مختلف خشکسالی، روابط مورد استفاده خشکسالی‌ها ارائه شده است. شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص درصد از نرمال بارندگی (PNPI)،شاخص ناهنجاری بارش (RAI)، شاخص خشکسالی بالم و مولی (BMDI)، شاخص دهک (DI)، شاخص کمبود تبخیر-تعرق (ETDI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) در دسته خشکسالی هواشناسی معرفی شدند. در دسته خشکسالی هیدرولوژیک هم شاخص‌های تأمین آب سطحی (SWSI) مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که شاخص SPI دارای مزیت نسبی بالایی برای پایش خشکسالی هواشناسی می‌باشد. هم‌چنین شاخص RDI در مقایسه با شاخص SPI حساسیت بیش‌تری به متغیرهای اقلیمی دارد و از میان شاخص‌های مورد مطالعه شاخص PNPI به‌دلیل خطای زیاد برای ارزیابی خشکسالی پیشنهاد نشده است. شاخص DI نیز به‌دلیل این‌که به داده‌های طولانی‌مدت برای ارزیابی خشکسالی نیاز دارد، برای مناطق دارای ایستگاه‌های جدید با دوره آماری کوتاه‌مدت مناسب نیست. در مجموع مرور شاخص‌های ارائه شده می‌تواند در تعیین شاخص مناسب در ارزیابی خشکسالی کمک نماید. شاخص‌های مذکور اطلاعاتی را برای چالش‌های مدیریت خشکسالی فراهم می‌کنند؛ به شرطی‌که جنبه‌های کاربردی خشکسالی مانند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در کنار ویژگی‌های احتمالی، آماری و تصادفی شناخته شده باشد.

کلمات کلیدی

" کمبود بارش"، "شدت خشکسالی"، "مقیاس زمانی"، "شاخص مناسب خشکسالی"

١- مقدمه

خشکسالی[١] یک خطر طبیعی است و زمانی اتفاق می‌افتد که بارندگی در یک بازه زمانی طولانی‌مدت کم‌تر از حد نرمال باشد؛ این پدیده در نتیجه برهم‌کنش متغیرهای متعدد در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، رخ می‌دهد (Dai, ٢٠١١) و یکی از مزمن‌ترین و از لحاظ اقتصادی زیان‌بارترین بلایای طبیعی به‌شمار می‌رود. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که خشکسالی حادثه‌ای طبیعی و پدیده‌ای آرام و مرموز است که به اعتقاد بسیاری از کارشناسان دارای مکانیسمی پیچیده بوده و ماهیت آن نسبت به تمامی حوادث طبیعی کم‌تر شناخته شده است. خشکسالی مانند ترسالی جزئی از اقلیم منطقه است که به‌طور طبیعی در هر جای دنیا اتفاق می‌افتد. خشکسالی با توجه به تأثیرات متفاوت آن و دیدگاه ذی‌نفعان مختلف، به چهار نوع خشکسالی هواشناسی[٢]، کشاورزی[٣]، هیدرولوژی[٤] و اقتصادی-اجتماعی[٥] طبقه‌بندی شده است (Wilhite and Glantz, ١٩٨٥، Mo, ٢٠٠٨، IPCC, ٢٠١٢). خشکسالی هواشناسی معمولاً بر اساس درجه خشکی (در مقایسه با مقدار عادی یا متوسط) و مدت دوره خشکی تعریف می‌شود. تعاریف خشکسالی هواشناسی باید برای هر منطقه خاص به‌طور جداگانه در نظر گرفته شود؛ زیرا شرایط آب و هوایی که منجر به کمبود بارندگی می‌شود از منطقه‌ای به منطقه دیگر متغیر است. خشکسالی به معنای هواشناسی آن یعنی کاهش

١. Drought

٢. Meteorological drought

٣. Agricultural drought

٤. Hydrological drought

٥. Socioeconomic drought

بارش یک بازه زمانی معین بر یک پهنه مشخص نسبت به میانگین بلندمدت بارش همان پهنه در همان بازه زمانی است (مسعودیان، ١٣٩٠). خشکسالی هواشناسی به کاهش بارش نسبت به میانگین دوره مشخص در یک منطقه اطلاق می‌شود و عامل شکل‌گیری سایر خشکسالی‌هاست (رحیمی و محمدی، ١٣٩٦). دو نوع شاخص خشکسالی وجود دارد که توسط Modesly و همکاران (١٩٩٤) توصیف شده است. یکی مربوط به ویژگی‌های محیط (اقلیمی) و دیگری مربوط به میزان دسترسی به آب است.١) شاخص‌های محیطی: این شاخص‌ها با شرایط آب و هواشناسی و هیدرولوژیکی ارتباط دارند و به اندازه‌گیری تأثیر مستقیم بر چرخه هیدرولوژیکی کمک می‌کنند. از مهم‌ترین شاخص‌ها می‌توان به کمبودها (دوره‌های خشک) در بارش، جریان آب رودخانه یا رطوبت خاک یا ترکیبی از آن‌ها اشاره کرد. آن‌ها فراوانی وقوع خکسالی و ویژگی‌های مختلف از جمله مدت زمان خشکسالی و یا شدت آن را نشان می‌دهند. تعریف این ویژگی‌ها به تعریف یک سطح آستانه نیاز دارد که معمولاً به‌عنوان میانگین حسابی یا سطح تقاضای آب پذیرفته می‌شود، اما هر سطح مناسب دیگری نیز می‌تواند مورد قبول واقع شود (Sen, ٢٠١٥).٢) شاخص‌های در دسترس بودن آب: به‌طور کلی این شاخص‌ها تأثیر خشکسالی بر منابع آبی (آب‌های سطحی یا زیرزمینی) به‌عنوان منابع تامین مصارف خانگی، کشاورزی و صنعتی، و یا تأثیر بر تغذیه آب زیرزمینی، برداشت و سطح آب مخازن را اندازه‌گیری می‌کنند. شاخص‌های خشکسالی مربوط به منابع آب نه‌تنها به وقایع طبیعی بلکه به مداخلات انسانی مانند افزایش مداوم تقاضای آب در مقابل امکانات محدود نیز وابسته هستند. هم‌چنین سوء مدیریت منابع آبی جهت تأمین آب نیز ممکن است شرایط خشکسالی را صرف‌نظر از کمبود بارندگی یا رواناب تحت‌تأثیر قرار دهد. تنش و کمبود آب از جمله ابعاد اجتماعی خشکسالی ناشی از سوء مدیریت می‌باشد (Sen, ٢٠١). در تعریف دیگر خشکسالی به دو دسته مشخص تقسیم می‌شود: خشکسالی‌های مفهومی که در آن‌ها فرمول‌بندی‌ها و ساز و کارهای خاصی وجود ندارد و خشکسالی‌های عملی که نیاز به پردازش در زمان واقعی از جمله شناسایی شروع، شدت و خاتمه دوره‌های خشکسالی دارند (Wilhite and Glantz, ١٩٨٥). خشکسالی کشاورزی ویژگی‌های مختلف خشکسالی هواشناسی یا هیدرولوژیکی را با تمرکز بر کمبود بارش، اختلاف بین تبخیر و تعرق واقعی و بالقوه، کمبود رطوبت خاک و کاهش سطح آب زیرزمینی یا مخازن ذخیره به تأثیرات کشاورزی ارتباط می‌دهد. میزان تقاضای آب گیاه به شرایط آب و هوایی غالب، ویژگی‌های زیستی یک گیاه خاص، مراحل رشد آن و ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک بستگی دارد. یک تعریف خوب از خشکسالی کشاورزی باید بتواند حساسیت متغیر محصولات کشاورزی را طی مراحل مختلف تولید محصول، از جوانه‌زنی تا تکامل، محاسبه کند (کردوانی، ١٣٨٠). در سال‌های وقوع خشکسالی، علاوه بر مسئله کمبود مقدار بارندگی، توزیع آن مطرح می‌شود و مفهوم خشکسالی هیدرولوژی شکل می‌گیرد. خشکسالی هیدرولوژی با اثرات کمبود دوره‌های بارش (از جمله بارش برف) بر تأمین آب سطحی یا زیرسطحی (به‌عنوان مثال رواناب، سطح مخزن و دریاچه، آب زیرزمینی) همراه است. فراوانی و شدت خشکسالی هیدرولوژی اغلب در مقیاس حوزه آبخیز یا رودخانه تعریف می‌شود (کردوانی، ١٣٨٠). خشکسالی اقتصادی- اجتماعی عرضه و تقاضای برخی کالاهای اقتصادی را با مؤلفه‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژی و کشاورزی مرتبط می‌کند. این نوع خشکسالی با دیگر انواع خشکسالی متفاوت است؛ زیرا وقوع آن به زمان و مکان فرآیندهای عرضه و تقاضا برای شناسایی یا طبقه‌بندی خشکسالی‌ها بستگی دارد (Wilhite, ١٩٩٧).

در کشور ایران نیز خشکسالی پدیده‌ای نو و ناشناخته نیست و موقعیت جغرافیایی و شرایط طبیعی کشور به شکلی است که شاهد خشکسالی‌هایی با شدت کم و زیاد بوده است (نوروزی و همکاران، ١٣٩٥). ایران از نظر منابع آب دارای وضعیت نامطلوب‌تری نسبت به متوسط دنیاست. متوسط بارندگی در ایران ٢٥٠ میلی‌متر است که کم‌تر از یک‌سوم متوسط بارندگی در سایر نقاط جهان است. به همین‌خاطر مشاهده خشکسالی با شدت‌های مختلف و ترسالی‌های مخرب در ایران امری طبیعی و تقریباً متداول است. این بی‌نظمی‌ها و نوسانات زیاد در بارش عامل خسارات زیادی است که هر ساله رخ می‌دهد؛ یعنی در سال‌های مرطوب و پرباران سیلاب‌های مخرب سبب تخریب سکونت‌گاه‌ها، زمین‌های کشاورزی، پل‌ها، جاده‌ها، تأسیسات و از همه مهم‌تر تلفات انسانی می‌شود. خشکسالی‌ها نیز سبب کاهش تولید محصولات کشاورزی، تلف شدن دام‌ها، تخریب مراتع، فرسایش خاک و افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود (عزیزی، ١٣٨٢؛ مهدویان و جوانمرد، ١٣٨٤). بخش عمده‌ای از وسعت کشور در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و پدیده خشکسالی جزء لاینفک و از ویژگی‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود؛ بر این اساس تقریباً هر پنج سال یک‌بار دوره خشکسالی دو تا سه‌ساله در کشور تجربه می‌شود.

این خشکسالی‌ها باعث کاهش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش آب قابل استفاده شده است. بروز خشکسالی و تداوم آن بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز تأثیرگذار می‌باشد. کاهش نزولات جوی که از مهم‌ترین پارامترهای تغذیه ورودی به سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد، می‌تواند باعث تخریب و از بین‌رفتن سفره‌های آب زیرزمینی شود (Wilhite, ١٩٩٧؛ نجاتی و همکاران، ١٣٨٨). تاتینا و همکاران (١٣٨٩) در مطالعه‌ای به پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در استان گیلان پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که خشکسالی به‌طور متناوب و منظم در منطقه مورد مطالعه اتفاق می‌افتد و هم‌چنین فراوانی وقوع خشکسالی در شدت‌های شدید و متوسط نسبت به ایستگاه‌های مرطوب بیش‌تر رخ می‌دهد. انواع مختلف داده‌ها و اطلاعات از جمله مشاهدات عینی، شبیه‌سازی مدل سطح زمین و سنجش از دور، می‌تواند برای توصیف خشکسالی‌ها استفاده شود و به‌طورکلی شاخص‌های ارزیابی خشکسالی برای به‌دست آوردن ویژگی‌های فیزیکی خشکسالی مانند فراوانی، مدت زمان، شدت و وسعت مکانی آن تهیه و استفاده شده است (Wilhite and Glantz, ١٩٨٥). شاخص‌های خشکسالی در سطوح و شرایط گوناگون و در بخش‌های مختلف جهان و با رویکردهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ برای مثال، Oladipo (١٩٨٥) مقایسه‌ای بین سه شاخص بالم و مولی (BMDI)[١]، شاخص ناهنجاری بارش (RAI)[٢] و شاخص خشکسالی پالمر (PDSI)[٣] برای ٤٠٧ ایستگاه در منطقه گریت پلنیز شمالی انجام داد و به این نتیجه رسید که از بین سه شاخص مورد تحقیق، شاخص خشکسالی BMDI به سه دلیل سادگی، دخالت فاکتورهای اندک و قابلیت سازگاری با هر شرایط اقلیمی و کم‌بودن فاکتورهای مورد استفاده، بهتر و مناسب‌تر است. این شاخص توانایی ارزیابی خشکسالی‌ها از نظر بزرگی و مقدار را داشته و برای پیش‌بینی خشکسالی منطقه‌ای بهتر است. Ntale و Gan، (٢٠٠٣) نیز مطالعه‌ای بین شاخص بارش استاندارد (SPI)[٤] و شاخص BMDI در شرق آفریقا انجام دادند و نتیجه گرفتند که شاخص SPI نتایج بهتر و مناسب‌تری نسبت به شاخص خشکسالی BMDI دارد. سرحدی و همکاران (١٣٨٨) به‌منظور برآورد گستره تحت‌تأثیر خشکسالی در استان اصفهان، بارندگی سالانه ١٢ ایستگاه مهم این استان شامل مراکز شهرستان‌ها در دوره آماری ١٩٧٣ تا ٢٠٠٣ را بررسی کردند. وضعیت خشکسالی در هر سال با بهره‌گیری از شاخص RAI، شاخص دهک بارش (DI)[٥]، درصد نرمال بارندگی (PNPI)[٦] و SPI محاسبه شد. نتایج این بررسی نشان داد بر پایه چهار شاخص مذکور خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای به‌صورت میانگین به‌ترتیب ٥٢، ٣١، ٣٧ و ٢٣ درصد منطقه را فرا می‌گیرد. این بررسی نشان داد از بین شاخص‌های مختلف، شاخص دهک بارش که نشان‌دهنده وضعیت خشکسالی است با طول جغرافیایی رابطه دارد. به‌عبارت دیگر خشکسالی با افزایش طول جغرافیایی و حرکت به سمت شرق استان با تناوب و شدت بیش‌تری رخ می‌دهد. درحالی‌که در شاخص‌های دیگر این رابطه وجود ندارد. هم‌چنین با توجه به شاخص بارش استانداردشده به‌عنوان مهم‌ترین شاخص در دوره آماری سی 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. هم‌چنین شایق و سلطانی (١٣٩٠) طی مطالعه‌ای تحت‌عنوان تحلیل گستره خشکسالی در استان یزد با استفاده از پنج شاخص خشکسالی (SPI، PNPI، RAI، BMDI و DI) و هم‌چنین با استفاده از تحلیل‌های آماری به این نتیجه رسیدند که شاخص خشکسالی BMDI طی دوره‌های ارزیابی هفت و نه ماهه که محدود به دوران بارش است، قابلیت خوبی در مقایسه سال‌های آماری از نظر شدت خشکسالی در یک ماه معین دارد. عطایی و همکاران (١٣٩٩) به بررسی و تبیین اثرات خشکسالی بر اقتصاد و مهاجرت روستایی در دهستان هشیوار شهرستان داراب طی دوره آماری ١٣٧٠ تا ١٣٩٠ پرداختند؛ در تحقیق حاضر از شاخص‌های خشکسالی SPI و PNPI استفاده شد. نتایج حاصل از شاخص SPI نشان داد که طی سال‌های ١٣٨٢، ١٣٨٤ و ١٣٨٧ منطقه مورد مطالعه با خشکسالی متوسط و در سال ١٣٧٤ با ترسالی بسیار شدید مواجه بوده است. هم‌چنین، براساس شاخص PNPI در سال‌های ١٣٨٠ و ١٣٨٢ در منطقه خشکسالی ضعیف و در سال‌های ١٣٧٨، ١٣٧٩ و ١٣٨٦ خشکسالی شدید حاکم بوده است. خشکسالی‌های این دوره سبب کاهش سطوح زیرکشت در شهرستان داراب شده و ناپایداری توسعه در زمینه‌های اقتصادی و اجتماعی به‌ویژه کاهش درآمد و مهاجرت را به‌همراه داشته است. Bayissa و همکاران (٢٠١٨) مطالعه‌ای برای مقایسه شش شاخص خشکسالی شامل شاخص کمبود تبخیر-تعرق (ETDI)[٧]، شاخص SPI، شاخص بارش-

١. Bhalme and Mooley Drought Index
٢. Rainfall Anomaly Index
٣. Palmer Drought Severity Index
٤. Standardized Precipitation Index
٥. Deciles of precipitation Index
٦. Percent of Normal Precipitation Index
٧. Evapotranspiration Deficit Index

تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)[1]، شاخص رطوبت خاک (SMDI)[2]، شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI)[3] و عملکرد آن‌ها با توجه به شناسایی وقایع تاریخی خشکسالی در بالادست حوضه رودخانه نیل آبی اتیوپی انجام دادند. این شاخص‌ها با استفاده از سری زمانی ماهانه بارش مشاهده‌شده، متوسط دما، دبی رودخانه و مدل تبخیر و تعرق و رطوبت خاک از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ محاسبه شد و ضرایب همبستگی پیرسون بین شش شاخص خشکسالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت؛ مقایسه نشان داد که هیچ یک از شش شاخص خشکسالی به‌طور جداگانه نمی‌تواند مجموعه تمام وقایع پیشین خشکسالی را شناسایی کند. با این‌حال، آن‌ها ممکن است با در نظر گرفتن چندین متغیر ورودی در دوره‌های مختلف آماری، مجموعه‌های ورودی را شناسایی کنند. بر اساس مطالعات صورت گرفته می‌توان جمع‌بندی نمود که برای تعیین وضعیت خشکسالی از نمایه‌های متعددی هم‌چون دهک‌های بارندگی، درصد نرمال بارندگی، ناهنجاری بارش، شاخص بارش استاندارد، شاخص تأمین آب سطحی، شاخص خشکسالی بالم و مولی، شاخص کمبود تبخیر-تعرق و شاخص شدت خشکسالی پالمر، شاخص شناسایی خشکسالی و شاخص رطوبت خاک استفاده می‌شود. در این مطالعه با توجه به اهمیت پدیده خشکسالی و مطالعه آن اهم شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک بررسی و نقاط ضعف و قدرت هر یک از آن‌ها ارزیابی شد.

۲- روش انجام تحقیق

ضمن معرفی مزایا، محدودیت‌ها و دامنه طبقات مختلف خشکسالی، روابط مورد استفاده خشکسالی‌ها ارائه شده است. شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص درصد از نرمال بارندگی (PNPI)،شاخص ناهنجاری بارش (RAI)، شاخص خشکسالی بالم و مولی (BMDI)، شاخص دهک (DI)، شاخص کمبود تبخیر-تعرق (ETDI)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) در دسته خشکسالی هواشناسی معرفی شدند. در دسته خشکسالی هیدرولوژیک هم شاخص‌های تأمین آب سطحی (SWSI) مورد بررسی قرار گرفت.

شاخص‌های خشکسالی

خلاصه‌ای از شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های مختلف زمانی در جدول ۱ ارائه شده است.

۱. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

۲. Soil Moisture Deficit Index

۳. Standardized Runoff Index

جدول (١): شاخص‌های مختلف خشکسالی به همراه متغیرها، مقیاس‌های زمانی و مفاهیم آن‌ها (سن، ٢٠١٥)

شاخص	فاکتورها	مقیاس زمانی	مفاهیم اصلی
PDSI	R و t و et و sm و rf	m	براساس ورودی، خروجی و ذخیره رطوبت است.
SWSI	P و sm	m	مشابه شاخص PDSI به جز فاکتور sm
PN	r	m	تقسیم r واقعی بر مقدار طبیعی
Deciles	r	m	تقسیم توزیع وقایع در یک داده آماری طولانی‌مدت r به بخش‌هایی که هرکدام نمایانگر ١٠ درصد هستند.
SPI	r	٣m و ٦m و ١٢m و ٢٤m و ٤٨m	اختلاف r با میانگین برای یک زمان خاص و تقسیم آن بر انحراف معیار
CMI	r و t	w	مشابه شاخص PDSI به جز در نظرگرفتن رطوبت موجود در بالای ١.٦ متر (٥ فوت) از پروفیل خاک
SMDI	sm	y	مجموع sm روزانه به مدت یک سال
CSDI	ev	s	مجموع مقدار محاسبه شده ev تقسیم بر ev مناسب در طول رشد محصولات خاص
RAI	r	m و y	R-r در مقایسه با مقدار مطلق ٣ و ٣- که به میانگین حدی ده + (مثبت) و ناهنجاری r – (منفی) اختصاص داده می‌شود.
BMDI	r	m و y	درصد انحراف r از میانگین طولانی‌مدت

P، فاکتورهای مورد استفاده در PDSI؛ r: بارش؛ et: تبخیر و تعرق؛ ev: تبخیر؛ t: دما؛ sm: رطوبت خاک؛ rf: رواناب؛ sn: برف‌پشته؛ w: هفته؛ m: ماه؛ s: فصل؛ y: سال؛ c: قرن؛ ٣m: سه ماه و ... .

٣- نتایج

بر اساس مرور منابع، شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی خشکسالی به همراه دسته‌بندی طبقات شدت خشکسالی در این بخش ارائه شده است و در مورد هر شاخص، موارد کاربرد، مزایا و معایب آن ارائه شده است.

١- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI از انواع شاخص‌های خشکسالی هواشناسی است که بر اساس احتمال بارش برای هر مقیاس زمانی قابل محاسبه است و به‌دلیل قابلیت تغییرپذیری آن توسط بسیاری از برنامه‌ریزان خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای این شاخص می‌توان به این مورد اشاره کرد که می‌تواند برای مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شود، هشدار سریع خشکسالی را ارائه دهد و به ارزیابی شدت خشکسالی به روشی ساده کمک می‌کند. این شاخص به‌علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه و قابلیت بسیار زیاد در مقایسه مکانی نتایج، به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی به‌ویژه تحلیل‌های مکانی شناخته می‌شود (اختری و همکاران، ١٣٨٥؛ Tsakiris و همکاران، ٢٠٠٧). این شاخص بر اساس این‌که کمبود بارش تأثیرات مختلفی بر آب زیرزمینی، ذخیره مخزن، رطوبت خاک و جریان آبراهه دارد، توسط McKee و همکاران (١٩٩٣) توسعه داده شد. این شاخص برای تعیین کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف طراحی شده و تأثیر خشکسالی را در قابلیت دسترسی به منابع مختلف آب نشان می‌دهد. کمبود بارش در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت، سبب ایجاد نوسان در رطوبت خاک و دوره‌های طولانی‌تر باعث تغییرات در منابع آب زیرزمینی و سطح آب مخازن می‌شود (Mishra و همکاران، ٢٠١٠). به‌همین دلایل McKee و همکاران (١٩٩٣) در ابتدا شاخص SPI را برای مقیاس‌های زمانی ٣، ٦، ١٢، ٢٤ و ٤٨ ماهه محاسبه کردند. درک این‌که بارندگی تأثیرهای مختلفی بر منابع آب مانند آب زیرزمینی، ذخایر آب سطحی و برف دارد، منجر به تدوین و ارائه شاخص SPI شد.

محاسبه شاخص SPI، مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب به سری طولانی‌مدت داده‌های بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه (سه‌ماهه، شش‌ماهه و...) در هر ایستگاه است. بسیاری از پژوهش‌گران از جمله McKee و همکاران (١٩٩٣) توزیع گاما را پیشنهاد دادند. با فرض پیروی مقدار بارندگی از توزیع گاما، گام بعدی در محاسبه شاخص SPI، انتقال احتمال تجمعی به‌دست آمده از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از معیار یک است. در واقع SPI عبارتست از متغیری از تابع توزیع نرمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظر از توزیع گامای به‌دست آمده، مساوی باشد. طبق این روش دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ١- یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت شود (رضیئی و همکاران، ١٣٨٦؛ مساعدی و همکاران، ١٣٨٧؛ Edwards and McKee، ١٩٩٧؛ Wu و

همکاران، ۲۰۰۷؛ Mishra و همکاران، ۲۰۰۹؛ Vicek و Huth، ۲۰۰۹). تابع توزیع گاما به‌صورت تابع چگالی احتمال یا فراوانی به‌صورت معادله (۱) تعریف شده است:

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{Sd} \quad (1)$$

که در آن P_i: مقدار بارندگی در مقیاس زمانی مورد نظر، $\bar{P}$: متوسط بارندگی طولانی‌مدت و Sd: انحراف از معیار بارندگی است. طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی SPI بر اساس طبقه‌بندی ادوارد و مک‌کی (ادوارد و مک‌کی، ۱۹۹۷) در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): طبقات شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (ادوارد و مک‌کی، ۱۹۹۷)

طبقه‌بندی شاخص	دامنه تغییرات
به‌شدت مرطوب	≥ ۲
خیلی مرطوب	۱/۵ – ۱/۹۹
رطوبت متوسط	۱ - ۱/۴۹
نرمال	۰/۹۹ – ۰/۹۹-
خشکسالی متوسط	۱/۴۹- – ۱-
خشکسالی شدید	۱/۹۹- – ۱/۵-
خشکسالی بسیار شدید	≤ ۲-

Bhunia و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ای برای تجزیه و تحلیل پدیده‌های خشکسالی در مراحل زمانی پیش، حین و پس از جریان‌های مانسونی در سه منطقه نسبتاً مستعد خشکسالی (پورولیا، بانکورا و میدناپور) بنگال غربی در هند با استفاده از شاخص خشکسالی SPI انجام دادند. نتایج نشان داد که وقوع خشکسالی با مقادیر SPI منفی در این مناطق با افزایش وقایع خشک و کاهش وقایع مرطوب و طبیعی همراه است و هم‌چنین افزایش میزان تغییرپذیری زمانی بارندگی، نشانه‌ای از وقوع خشکسالی است و دوره بازگشت خشکسالی با شدت متوسط ٦ تا ١٢ سال، افزایش وقایع خشک و کاهش وقایع مرطوب و طبیعی از علل کمبود آب است. Bordi and Sutera (۲۰۰٤) در مطالعه‌ای در دو حوزه سیسیل و آلب در کشور آلمان ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها را از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۰ براساس شاخص بارش استانداردشده (SPI) محاسبه کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که شاخص بارش استانداردشده دارای تناوبی بین ۳/٤ تا ۱۲ سال در هر دو منطقه می‌باشد که باعث ایجاد خشکسالی و ترسالی در منطقه مورد مطالعه می‌شود. در حوزه سیسیل بر خلاف حوزه آلب یک روند خطی مشاهده می‌گردد که احتمالا مربوط به تأثیر وضعیت جوی با دوره بازگشت طولانی‌مدت است هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده این امر بودند که در مقیاس‌های زمانی بلندمدت اگر در رژیم آلب شرایط خشکسالی حاکم باشد در رژیم سیسیل ترسالی حاکم است.

۲- شاخص درصد از نرمال بارندگی (PNPI)

شاخص PNPI توسط Willeke و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شده است. شاخص PNPI یکی از شاخص‌های ساده خشکسالی است که می‌تواند در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه یا سال آبی محاسبه شود (Javan و همکاران، ۲۰۱٦). محققان زیادی از این شاخص استفاده می‌کنند که به‌صورت معادله (۲) به‌دست می‌آید (ویلک و همکاران، ۱۹۹۸).

$$PNPI = \frac{P_i}{\bar{P}} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه P_i میزان بارندگی در ماه i ام و $\bar{P}$ میانگین طولانی‌مدت بارندگی همان ماه است. طبقات مختلف این نمایه در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): طبقات نمایه شاخص خشکسالی PNPI (Willeke و همکاران، ۱۹۹٤)

طبقه‌بندی خشکسالی	PNPI (درصد)
نرمال	بیش از ۸۰
خشکسالی ضعیف	۸۰-۷۰
خشکسالی متوسط	۷۰-۵۵
خشکسالی شدید	۵۵-٤۰
خشکسالی بسیار شدید	کم‌تر از ٤۰

جهانگیر و سارانی‌راد (۱۳۹۸) به بررسی وضعیت خشکسالی استان خراسان جنوبی، با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی PNPI و شاخص روش استانداردسازی (Z) پرداختند. نتایج حاصل از شاخص PNPI نشان داد که خشکسالی اکثر ایستگاه‌ها در محدوده خشکی متوسط تا رطوبت متوسط بوده است و هم‌چنین نتایج حاصل از ارزیابی فرضیه وقوع خشکسالی بسیار شدید است که در سال وقوع کمینه بارندگی اتفاق افتاده است و در این مطالعه شاخص PNPI شاخص مناسب‌تری برای منطقه ارزیابی می‌شود. جهانگیر و نوروزی (۱۳۹٦) در پژوهشی شاخص‌های PNPI و RAI را در هشت ایستگاه آبادان، اهواز، بندر ماهشهر، بستان، مسجد سلیمان، امیدیه، رامهرمز و صفی‌آباد در استان خوزستان طی دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱٤ بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد بر اساس شاخص درصد از نرمال بارندگی شدیدترین خشکسالی طی دوره زمانی مورد مطالعه در ایستگاه بندر ماهشهر با مقدار ۲۰/۳۹ در سال ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. هم‌چنین براساس شاخص ناهنجاری بارش بیشترین مقدار ترسالی در ایستگاه اهواز با مقدار۸/٦ در سال ۱۹۹۷ به‌وقوع پیوسته است.

۳- شاخص ناهنجاری بارش (RAI)

شاخص RAI توسط Van Rooy (١٩٦٥) ارائه شده است. استفاده از شاخص RAI به‌عنوان یک شاخص آب و هوایی واحد، برای این شاخص بارندگی، ماه یا سال معین را روی مقیاس خطی ارزیابی می‌کند که از روی سری داده‌ها به‌دست می‌آید. این شاخص دو ناهنجاری مثبت و منفی را در نظر می‌گیرد. برای محاسبه این شاخص، ابتدا داده‌های بارش به‌ترتیب نزولی مرتب می‌شوند؛ سپس میانگین ١٠ مورد از بزرگ‌ترین مقادیر بارندگی و ١٠ مورد از کوچک‌ترین مقادیر بارندگی استخراج می‌شود تا به‌ترتیب آستانه ناهنجاری مثبت و آستانه ناهنجاری منفی مشخص شود. آستانه‌ها به‌ترتیب طبق معادلات (٣) و (٤) محاسبه می‌شوند:

$$RAI = 3 \times \left[\frac{(p - \bar{p})}{(\bar{m} - \bar{p})}\right] \quad (٣)$$

$$RAI = -3 \times \left[\frac{(p - \bar{p})}{(\bar{m} - \bar{p})}\right] \quad (٤)$$

در این روابط، منظور از p داده‌های بارندگی واقعی، $\bar{p}$ میانگین درازمدت بارندگی ماهانه در ایستگاه‌های مد نظر و $\bar{m}$ میانگین ١٠ مورد از کوچک‌ترین مقادیر بارندگی اتفاق‌افتاده طی دوره مطالعاتی برای ناهنجاری مثبت در رابطه (٣) و میانگین ١٠ مورد از بزرگ‌ترین مقادیر بارندگی اتفاق‌افتاده طی دوره مطالعاتی برای ناهنجاری منفی در رابطه (٤) است. طبقات مختلف این شاخص در جدول (٤) آمده است.

جدول (٤): طبقات نمایه شاخص خشکسالی RAI (وان‌روی، ١٩٦٥)

وضعیت خشکسالی	RAI
نزدیک به نرمال	٠/٣- تا ٠/٣+
خشکسالی ضعیف	١/٢- تا ٠/٣-
خشکسالی متوسط	٢/١- تا ١/٢-
خشکسالی شدید	٣- تا ٢/١-
خشکسالی بسیار شدید	کوچک‌تر یا مساوی ٣-

شاخص RAI شامل یک روش رتبه‌بندی برای تعیین میزان ناهنجاری‌های مثبت و منفی است (Keyantash و Dracup، ٢٠٠٢). این شاخص با توجه به سادگی و عملی بودن آن برای مقابله با خشکسالی در مراحل مختلف برای مناطق مختلف آب و هوایی، اغلب در تخمین خشکسالی استفاده شده است (میشر و Singh، ٢٠١٠؛ منتصری و همکاران، ٢٠١٧). صدیق و همکاران (٢٠٢٠) مطالعه‌ای با هدف برآورد شاخص RAI و تأثیرات آن بر تولید محصول در شهر یولا انجام دادند؛ یافته‌ها نشان داد که منطقه مورد مطالعه برای مدت ١٩ سال تحت شرایط رطوبت قرار می‌گیرد؛ رطوبت طبیعی در ٦ سال و شرایط خشک در ١٥ سال تخمین زده شد که بیش‌تر در دهه‌های اخیر رخ داده است و نشان‌گر تغییر اقلیم آشکار در اثر کمبود بارندگی است و در نتیجه بر رشد محصول تأثیر گذاشته است.

٤- شاخص خشکسالی بالم و مولی (BMDI)

این شاخص برای اولین بار در سال ١٩٨٠ توسط Bhalme و Mooley برای رژیم‌های مونسونی در هندوستان استفاده شد. شاخص مذکور بیش‌ترین همبستگی را با دوره‌های ترسالی از خود نشان می‌دهد (بالم و مولی، ١٩٨٠). Aremu و Olatunde (٢٠١٢) طی پژوهشی شدت‌های خشکسالی نیجریه را در یک دوره ٧٠ ساله با استفاده از شاخص BMDI مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که شدت‌های کم‌تر، فراوانی بیش‌تری داشته و خشکسالی‌های شدیدتر به مناطق ساحلی محدود می‌شود.

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 شدت خشکسالی یک ماه معین، ضریبی از شدت خشکسالی ماه قبل نیز دخالت داده می‌شود (Olatunde، ١٩٨٥). مراحل محاسبه این شاخص به شرح زیر است:

مرحله (١): محاسبه میانگین درازمدت داده‌های بارش ($\bar{X}$)، انحراف از معیار داده‌های بارش (σ) و برآورد شاخص رطوبت ماهانه (MI)

$$MI = (X - \frac{\bar{X}}{\sigma}) \times 100 \quad (٥)$$

مرحله (٢): تعیین کم‌ترین مقدار MI در دوره مورد بررسی 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 زیر است:

$$\sum_{i=1}^{K} MI_k = a + bk \quad (٦)$$

در این رابطه MI_k شاخص رطوبتی تجمعی در ماه، k و K شماره ماه و a و b ضرایب ثابت معادله هستند.

مرحله (٣): استخراج معادلات خطوط برازش یافته بر چهار طبقه خشکسالی به طوری‌که مقادیر شدت خشکسالی واگذار شده به این خطوط را بتوان تعیین کرد. معادله کلی خطوط به‌صورت زیر است.

$$I_K = \sum_{t=1}^{k} \frac{MI_t}{[0/25\ (|a| + |b|k]} \quad (٧)$$

در این رابطه I_K شدت خشکسالی ماه k ام است. با استفاده از رابطه ٧ سهم شاخص رطوبتی MI در شدت خشکسالی برای هر ماه را می‌توان با قرار دادن K=١ در آن تعیین کرد:

$$I_1 = \sum_{1}^{1} \frac{MI_1}{[0/25\ (|a| + |b|)]} \quad (٨)$$

مرحله (٤): 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 حفظ شده بستگی دارد؛ بنابراین برای همه ماه‌هایی که در پی ماه خشک اولیه قرار می‌گیرند، لحاظ کردن یک عبارت اضافی در معادله (٧) ضروری بوده تا این معادله به‌صورت رابطه (٩) بیان شود:

$$\Delta I_K = (MI_K/d) + CI_K - 1 \quad (٩)$$

در این رابطه d و c ضرایب ثابت معادله $d=۰/۲۵|a+b|$ و $c=۰/۲۵(b/d)$ هستند.

مرحله ٥- در نهایت فرم کلی شاخص خشکسالی بالم و مولی برای هر ماه و برای کل دوره به‌صورت روابط (١٠) و (١١) نوشته می‌شود:

$$I_K = (\frac{M_K}{d}) + (1 + C)\, I_{K-1} \quad (١٠)$$

$$BMDI = \sum_{i=1}^{K} I_K / K \quad (١١)$$

طبقات شاخص خشکسالی بالم و مولی در جدول (٥) ارائه شده است.

جدول (٥): طبقات شاخص خشکسالی بالم و مولی (بالم و مولی، ١٩٨٠)

توصیف وضعیت	طبقات شاخص BMDI
نزدیک نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹+
خشکسالی ضعیف	۱/۹۹- تا ۱-
خشکسالی متوسط	۲/۹۹- تا ۲-
خشکسالی شدید	۳- تا ۳/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	کوچک‌تر یا مساوی ٤-

٥- شاخص دهک (DI)

شاخص DI به‌عنوان یک رتبه‌بندی از میزان بارش در یک بازه زمانی خاص تعریف شده و به‌منظور رفع نواقص موجود در روش درصد از نرمال ارائه شده است (Gibbs و Maher، ١٩٦٧). شاخص دهک‌ها به‌شرطی‌که داده‌های آب و هوایی طولانی‌مدت در دسترس باشد، اندازه‌گیری دقیق آماری بارش را ارائه می‌دهد. مرید و همکاران (٢٠٠٦) طی پژوهشی هفت شاخص خشکسالی را در استان تهران با استفاده از ١١ سال آماری آن شهر مقایسه کردند؛ آن‌ها دریافتند که شاخص‌های مورد مطالعه عملکرد یکسانی در شناسایی خشکسالی داشته و شاخص خشکسالی DI دارای حساسیت زیادی نسبت به وقایع بارش در یک سال بوده است. در محاسبه دهک‌ها، ابتدا داده‌های بارندگی طولانی‌مدت برای ایجاد توزیع فراوانی تجمعی از بیش‌ترین به کم‌ترین مقدار رتبه‌بندی می‌شود. سپس این توزیع براساس احتمالات مساوی به ١٠ قسمت یا دهک تقسیم می‌شود (گیبز و ماهر، ١٩٦٧). دهک اول مقدار بارندگی است که از ١٠ درصد کل بارش کم‌تر باشد، دهک دوم بین ١٠ تا ٢٠ درصد و... که در جدول (٥) نشان داده شده است. شاخص دهک نسبت به شاخص شدت خشکسالی پالمر به داده‌ها و پیش‌فرض‌های کم‌تری نیاز دارد (Smith و همکاران، ١٩٩٣). این روش بر مبنای کاربرد توزیع فراوانی تجمعی یک ایستگاه بنا شده است و به‌طور وسیع مورد استفاده محققین استرالیایی قرار گرفته است (بهیار، ١٣٨٦). تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص بارش و مقیاس زمانی مورد استفاده در این شاخص نیز مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه است (محمدیان و همکاران، ١٣٨٩). روش محاسبه شاخص دهک‌ها به‌صورت زیر است (نصری، ١٣٨٦):در ابتدا، داده‌های بارندگی ماهانه و یا سالانه به‌صورت صعودی مرتب می‌شوند. سپس احتمال وقوع بارش از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Pi = \frac{i}{N+1} \times 100 \quad (١٢)$$

که در آن Pi احتمال وقوع بارندگی در شماره ردیف i ام و Nتعداد داده‌های بارندگی است.

پس از محاسبه Pi و برحسب این‌که یک مقدار Pi در چه فاصله دهکی (فاصله ١٠درصدی) قرار گرفته باشد، یکی از درجه‌های خشکی به آن نسبت داده می‌شود. بنابراین اولین دهک مقدار بارندگی است که از کم‌ترین ١٠ درصد تجاوز نمی‌کند. دومین دهک مقدار بارندگی است که از کم‌ترین ٢٠ درصد کل تجاوز نکرده و به‌همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند. دهک پنجم یا میانه مقدار بارشی است که از ٥٠ درصد رخدادها تجاوز نمی‌کند. پس از محاسبه Pi طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس جدول (٦) ارائه می‌شود (سلطانی، ١٣٨٥).

جدول (٦) طبقات مختلف خشکسالی با استفاده از شاخص دهک‌ها (گیبز و ماهر، ١٩٦٧)

درصد وقوع	وضعیت خشکسالی	شماره دهک
کمتر از ١٠	خشکسالی خیلی شدید	اول
١٠ تا ٢٠	خشکسالی شدید	دوم
٢٠ تا ٣٠	خشکسالی	سوم
٣٠ تا ٤٠	تقریباً نرمال	چهارم
٤٠ تا ٥٠	نرمال	پنجم
٥٠ تا ٦٠	کمی نرمال	ششم
٦٠ تا ٧٠	کمی مرطوب	هفتم
٧٠ تا ٨٠	مرطوب	هشتم
٨٠ تا ٩٠	بسیار مرطوب	نهم
بیش‌تر از ٩٠	فوق‌العاده مرطوب	دهم

٦- شاخص کمبود تبخیر-تعرق (ETDI)

ویژگی‌های مهم مورد توجه در رویکرد محاسباتی شاخص ETDI به‌صورت زیر است (Narasimhan و Srinivasan، ٢٠٠٥):

١- شاخص باید به خشکسالی کشاورزی پاسخ دهد.

٢- شاخص باید بتواند به تمام فصول پاسخ دهد.

٣- شاخص باید صرف‌نظر از مناطق اقلیمی از نظر مکانی قابل‌مقایسه باشد.

شاخص کمبود تبخیر-تعرق مشابه با شاخص کمبود رطوبت خاک محاسبه می‌شود با این تفاوت که در آن به‌جای استفاده از تبخیر و تعرق از نسبت تنش آب استفاده می‌شود. برای اجرای نجام مدل احتیاج به تبخیر-تعرق واقعی و تبخیر-تعرق پتانسیل محصول در یک دوره هفت روزه از هفته و برای ٥٢ هفته در سال است. تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل با استفاده از مدل SWAP[1] که قبلاً واسنجی شده، محاسبه می‌شود. اعداد به‌دست آمده روزانه است که برای استفاده در شاخص ETDI باید تبدیل به ماهانه شوند (یعقوب‌زاده و همکاران، ١٣٩٦). نسبت تنش آب در آن با استفاده از رابطه (١٣) محاسبه می‌شود:

$$WS = \frac{PET - AET}{PET} \quad (١٣)$$

که در آن، WS نسبت تنش هفتگی آب، PET تبخیر-تعرق پتانسیل هفتگی محصول و AET تبخیر-تعرق واقعی است. مقدار نسبت تنش وقتی در شرایطی که تبخیر-تعرق وجود نداشته باشد برابر یک و وقتی تبخیر-تعرق واقعی برابر تبخیر-تعرق پتانسیل محصول باشد برابر صفر خواهد بود. تبخیر-تعرق برای هر هفته از یک سال طی دوره آماری طولانی با متوسط گرفتن نسبت تنش در دوره آماری به‌دست می‌آید. هم‌چنین حداکثر و حداقل نسبت تنش نیز مشابه متوسط در یک دوره آماری طولانی به‌دست می‌آید. از طریق متوسط، حداکثر و حداقل نسبت تنش در یک دوره آماری طولانی، درصد انحراف تنش آب برای یک دوره دیگر آماری را می‌توان به کمک رابطه‌های (١٤) و (١٥) محاسبه نمود:

$$WS_{i,j} = MWS_j \quad \text{اگر} \quad WSA_{i,j} = \frac{MWS_j - WS_{i,j}}{MWS_j - \min SW_j} \times 100 \quad (١٤)$$

$$WS_{i,j} > MWS_j \quad \text{اگر} \quad WSA_{i,j} = \frac{MWS_j - WS_{i,j}}{\max WS_j - MWS_j} \times 100 \quad (١٥)$$

که در آن‌ها، WSA انحراف تنش آب هفتگی، MWS_j متوسط طولانی‌مدت تنش آب برای هفته j، $maxWS_j$ حداکثر طولانی‌مدت تنش آب برای هفته j، $minWS_j$ حداقل طولانی‌مدت تنش آب برای هفته j، i تعداد سال‌های آماری و j تعداد هفته (٥٢-١ هفته در سال) است. انحراف نسبت تنش برای هر هفته مشابه درصد کمبود رطوبت خاک از ١٠٠ تا ١٠٠- متغیر است. در ١٠٠ بیش‌ترین تبخیر-تعرق و در ١٠٠- کم‌ترین تبخیر-تعرق وجود دارد. شاخص کمبود تبخیر-تعرق به کمک رابطه ١٦ محاسبه می‌شود و طبقه‌بندی آن در جدول (٧) ارائه شده است (Dubrovsky و همکاران، ٢٠٠٩).

$$ETDI_j = 0.5 \times ETDI_{j-1} + \frac{WSA_j}{50} \quad (١٦)$$

جدول (٧): طبقه‌بندی شاخص خشکسالی کشاورزی (ETDI) (Dubrovsky و همکاران، ٢٠٠٩)

طبقه‌بندی شاخص ETDI	دامنه تغییرات
به‌شدت مرطوب	بزرگ‌تر از ٤
خیلی مرطوب	(٣ تا ٣/٩٩)
رطوبت متوسط	(٢ تا ٢/٩٩)
رطوبت خفیف	(١ تا ١/٩٩)
مرطوب اولیه	(٠/٥ تا ٠/٩٩)
نرمال	(٠/٤٩ تا ٠/٤٩-)
خشکسالی اولیه	(٠/٥- تا ٠/٩٩-)
خشکسالی خفیف	(١- تا ١/٩٩-)
خشکسالی متوسط	(٢- تا ٢/٩٩-)
خشکسالی شدید	(٣- تا ٣/٩٩-)
خشکسالی بسیار شدید	کوچک‌تر از ٤-

٧- شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)

پالمر یکی از توسعه‌دهندگان رویکرد فیزیکی برای پدیده خشکسالی است. از دیدگاه پالمر، خشکسالی یک دوره زمانی چندماهه یا چندساله است که طی آن، عرضه رطوبت واقعی در یک مکان معین به‌طور نسبتاً پایداری از عرضه رطوبتی مناسب از نظر اقلیمی برای شرایط موجود کم‌تر شود (Palmer، ١٩٦٥). مبنای توسعه این شاخص به این صورت بود که خشکسالی یک پدیده فیزیکی در نظر گرفته شده است و از قوانین سامانه‌های جوی و هیدرولوژیکی تبعیت می‌کند و به‌دلیل پیچیدگی زیاد فرآیندهای دخیل در آن رویکرد دقیق فیزیکی برای آن ارائه نشده است (حجابی و همکاران، ١٣٩٧). پالمر با استفاده از متغیرهای دما، بارش و رطوبت قابل دسترس خاک و بر اساس یک مدل ترازمندی آب ساده، برای برآورد عرضه و تقاضای رطوبت یک مدل خاک دولایه، یک شاخص فیزیکی-آماری به نام شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) را فرمول‌بندی کرد. نیاز به متغیرهای ورودی کم، لحاظ کردن همه مؤلفه‌های ترازمندی آب در محاسبات شاخص و قابلیت مقایسه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف از نقاط قوت شاخص PDSI محسوب می‌شوند. این شاخص نقاط قوت زیادی نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی دارد، اما دارای ضعف و محدودیت‌هایی نیز هست که توسط Karl و Knight (١٩٨٥) و Alley (١٩٨٤) تشریح شده‌اند.

[1]. Soil-Water-Atmosphere-Plant

شاخص PDSI از مدل ساده شده تبخیر پتانسیل Thornthwaite استفاده می‌کند که یکی از محدودیت‌های آن عدم وجود تبخیر در دمای کم‌تر از صفر درجه است. هم‌چنین، این مدل اثر بسیاری از عوامل از جمله کمبود فشار بخار، سرعت باد، پوشش گیاهی و نوع خاک را در تبخیر در نظر نمی‌گیرد و فقط به تغییرات دما واکنش نشان می‌دهد (Xu و همکاران، ٢٠١٢). بنابراین شاخص پالمر مبتنی بر روش تورنت‌وایت به‌طور نادرستی به گرمایش جهانی دهه‌های اخیر واکنش نشان می‌دهد (Yan و همکاران، ٢٠١٣). در ایران، این شاخص برای بررسی مشخصه‌های مکانی و زمانی خشکسالی (Zoljoodi و Didevarasl، ٢٠١٣)، توسعه سیستم‌های پایش خشکسالی‌ها (کارآموز و همکاران، ٢٠١٣)، اثرات خشکسالی بر هیدرولوژی و کشاورزی (کارآموز و همکاران، ٢٠٠٤)، ارزیابی آسیب‌پذیری از خشکسالی (بابایی و همکاران، ٢٠١٣) و پیش‌بینی خشکسالی (کارآموز و همکاران، ٢٠٠٩) استفاده شده است.

محاسبه شاخص پالمر با برآورد مقادیر واقعی و پتانسیل اجزای معادله بیلان آغاز می‌شود که عبارتند از تغذیه واقعی (R)و پتانسیل (PR)، تلفات واقعی (L) و پتانسیل (PL)، رواناب واقعی (RO) و پتانسیل (PRO) و تبخیر-تعرق واقعی (ET) و پتانسیل (PE). سپس ضرایب مربوط به این عوامل به‌صورت زیر برای هر یک از ماه‌های سال تعیین می‌شوند (بذرافشان و همکاران، ١٣٩٤).

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} ET_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} PE_{ij}} \quad (١٧)$$

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} R_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} PR_{ij}} \quad (١٨)$$

$$\gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} RO_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} PRO_{ij}} \quad (١٩)$$

$$\delta_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} L_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} PL_{ij}} \quad (٢٠)$$

در این روابط α، β، γ و δ به‌ترتیب ضریب تبخیر-تعرق، ضریب تغذیه، ضریب رواناب و ضریب تلفات بوده و n تعداد سال‌های آماری، i و j به‌ترتیب ماه و سال هستند. جدول (٨) طبقه‌بندی شاخص PDSI را نشان می‌دهد.

جدول (٨): طبقه‌بندی شاخص PDSI (پالمر، ١٩٦٥)

طبقه‌بندی شاخص	دامنه تغییرات
به‌شدت مرطوب	٤ یا بیش‌تر
خیلی مرطوب	٣ تا ٣/٩٩
رطوبت متوسط	٢ تا ٢/٩٩
رطوبت خفیف	١ تا ١/٩٩
مرطوب اولیه	٠/٥ تا ٠/٩٩
نرمال	+٠/٤٩ تا -٠/٤٩
خشکسالی اولیه	-٠/٥ تا -٠/٩٩
خشکسالی خفیف	-١ تا -١/٩٩
خشکسالی متوسط	-٢ تا -٢/٩٩
خشکسالی شدید	-٣ تا -٣/٩٩
خشکسالی بسیار شدید	-٤ و کم‌تر

٨- شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

شاخص RDI در ابتدا توسط تساکریس و Vangelis (٢٠٠٤) ارائه شد و اطلاعات جامع از این شاخص برای مواجهه با کمبود آب به روشی دقیق‌تر، به‌عنوان نوعی تعادل بین ورودی و خروجی در سیستم آب و نحوه محاسبه آن توسط Tsakiris و Vangelis (٢٠٠٥) و Tsakiris و همکاران (٢٠٠٧) انتشار یافت. این شاخص قادر است خشکسالی را در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت (یک تا ٤٨ ماه) پایش نماید. این شاخص به‌دلیل نیاز به داده‌های کم، حساسیت بالا و انعطاف‌پذیری زیاد کاربرد آن در حال افزایش است؛ شاخص RDI با توجه به این که بر مبنای بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می‌شود، نسبت به شاخص‌های خشکسالی که تنها بر مبنای بارندگی هستند (مانند شاخص بارش استاندارد شده) به متغیرها و تغییرات آب و هوایی حساسیت بیش‌تری دارد (تساکریس و وانگلیز، ٢٠٠٤). شدت خشکسالی را می‌توان از طریق محاسبه شاخص RDI و به‌طور دقیق‌تر از طریق فرم استاندارد شده آن (RDI_{st}) ارزیابی کرد. این شاخص بر اساس بارش تجمعی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) استوار است. به‌نظر نمی‌رسد که روش محاسبه PET بر نتایج RDI تأثیر بگذارد (وانگلیز و همکاران، ٢٠١٣). مقدار اولیه این شاخص ($\alpha_k^{(i)}$) برای سال اول در مدت زمان k (ماه) به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{k} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{k} PET_{ij}} \quad ; \; i = 1(1)\,N \;\; و \;\; j = 1(1)\,k \quad (٢١)$$

که در آن P_{ij} و PET_{ij} مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل ماه j ام از سال i ام و N تعداد کل سال‌های دوره آماری است.

با فرض استفاده از توزیع معمولی، می‌توان از معادله زیر برای محاسبه RDI_{st} استفاده کرد:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_i} \quad (٢٢)$$

که در آن y_i برابر با $\ln(\alpha_k^{(i)})$، $\bar{y}$ میانگین حسابی و $\hat{\sigma}_i$ انحراف معیار مقادیر y_i است.

در توسعه شاخص RDI_{st} از مفاهیم شاخص SPI استفاده شده است؛ بنابراین مقادیر طبقات مختلف وضعیت خشکسالی مشابه با طبقات ارائه شده توسط ادوارد و مک‌کی (١٩٩٧) برای شاخص SPI است که در جدول (١) ارائه شده است.

٩- شاخص تأمین آب سطحی (SWSI)

شاخص SWSI نخستین بار توسط Shafer و Dezman (١٩٨٢) برای تکمیل پایش خشکسالی در ایالت کلرادو در آمریکا که ذخیره برف منبع عمده تأمین آب در این منطقه است، پیشنهاد شد. این شاخص متداول‌ترین شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی برای مناطقی است که برف در آن منبع اصلی جریان‌های سطحی است (کارآموز و عراقی نژاد، ١٣٨٤؛ رحیمی و محمدی، ١٣٩٦).هدف شاخص SWSI، به‌دست آوردن معیاری برای تعیین مقدار آب موجود در مناطق کوهستانی و امکان مقایسه مناطق مختلف با یک‌دیگر است. شاخص SWSI شدت خشکسالی‌های به‌وقوع‌پیوسته در منطقه را تعیین می‌کند و می‌توان با کمک این شاخص وضعیت آینده را پیش‌بینی نمود. برای انجام پیش‌بینی با شاخص SWSI، کافی است به‌جای هر کدام از متغیرهای به‌کار رفته در رابطه، مقادیر پیش‌بینی آن پارامتر را در نظر گرفت. در شاخص تأمین آب سطحی چهار پارامتر مورد نظر است. این داده‌ها عبارت‌اند از: ذخیره برفی، جریان رودخانه‌ای، بارش و حجم مخازن سطحی آب (رحیمی و محمدی، ١٣٩٦). با توجه به فصلی بودن این شاخص در هر زمان تنها از سه پارامتر در معادلات استفاده می‌شود (تیموری و فتح‌زاده، ١٣٩٣). مقدار شاخص SWSI با استفاده از رابطه (٢٣) محاسبه می‌شود:

$$SWSi = \frac{a * p_{snow} + b * p_{prec} + c * p_{stream} + d * p_{reservoir} - 50}{12} \quad (٢٣)$$

که در این رابطه a، b، c و d وزن هریک از اجزا در نظر گرفته شده و مجموع آن برابر با یک است. Pi نیز احتمال تجاوز برای متغیر i ام برف، باران، رواناب و مخزن است. معادله بالا، تفاضل عدد ٥٠ در صورت کسر برای آن است که مقادیر شاخص حول صفر متقارن است. هم‌چنین با تقسیم بر عدد ١٢، مقادیر شاخص بین ٤ /٢ – و ٤ /٢+ قرار می‌گیرد (شفر و دژمن، ١٩٨٢). جدول (٩) نشان‌دهنده طبقات مختلف شاخص خشکسالی تامین آب سطحی است.

جدول (٩): وضعیت خشکسالی متناظر با مقادیر شاخص SWSI (شفر و دژمن، ١٩٨٢)

وضعیت هیدرولوژیکی	مقادیر شاخص
خیلی مرطوب	٤
رطوبت کم	٢
نزدیک نرمال	-١
خشکی کم	-٢
خشکی زیاد	-٣
خشکی شدید	-٤

به‌دلیل این‌که تعیین وزن هر کدام از اجزای رابطه به‌راحتی میسر نبوده و تعیین میزان آب حاصل از ذوب برف با عدم‌قطعیت زیادی همراه است، Garen (١٩٩٣) از اثر غیرمستقیم مقدار برف در جریان رودخانه استفاده کرد و رابطه‌ای را ارائه نمود که آن را روش اصلاحی شاخص خشکسالی SWSI می‌نامند (رابطه ٢٢).

$$SWSI_{mod} = \frac{p - 50}{12} \quad (٢٤)$$

در این رابطه، P برابر با احتمال محاسبه شده از روی تابع توزیع احتمالی برازش شده به سری مجموع جریان بر حسب درصد است (کارآموز و عراقی‌نژاد، ١٣٨٤).

١٠- شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI)

شاخص خشکسالی SMDI شاخصی است که بر مبنای مجموع رطوبت خاک به‌طور روزانه برای یک سال استوار بوده و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در آن، داده‌های رطوبت خاک است. این داده‌ها به‌کمک مدل شبیه‌ساز رطوبت برای دوره پایه به طریق زیر محاسبه می‌شود (ناراسیمان و سریناواسان، ٢٠٠٥).

$$SD_i = \frac{SW_i - MSW_i}{MSW_i - minSW_i} \times 100 \quad \text{If} \quad SW_i \geq MSW_i \quad (٢٥)$$

$$SD_i = \frac{SW_i - MSW_i}{maxSW_i - MSW_i} \times 100 \quad \text{If} \quad SW_i > MSW_i \quad (٢٦)$$

که i سال مورد نظر، SW مجموع رطوبت روزانه خاک در سال مورد نظر، MSW مقدار میانه مجموع رطوبت روزانه خاک طی دوره آماری، MINSW مقدار حداقل مجموع رطوبت روزانه خاک طی دوره آماری، MAXSW مقدار حداکثر مجموع رطوبت روزانه خاک طی دوره آماری و SD درصد کمبود رطوبت خاک است. SD از ١٠٠+ تا ١٠٠ – متغیر است. در١٠٠+ خاک مرطوب‌ترین و در ١٠٠ – خاک خشک‌ترین وضعیت را داراست. شاخص SMDI از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$SMDI_i = 0/5\ SMDI_{i-1} + \frac{SD_i}{50} \quad (٢٧)$$

این شاخص از ٤+ تا ٤- یعنی از مرطوب به خشک متغیر است. در این شاخص، گام زمانی قبل در شرایط کنونی خشکسالی لحاظ می‌شود (اعتدالی و همکاران، ١٣٩١).

اعتدالی و همکاران (١٣٩١) در پژوهشی به بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی بر اساس رطوبت خاک در ایستگاه سینوپتیک قزوین پرداختند. در این مطالعه شاخص خشکسالی رطوبت خاک با شاخص‌های خشکسالی PNI، DI، SPI و CZI بین سال‌های ١٩٨٢ تا ٢٠٠٨ مقایسه شد و نتایج این تحقیق نشان داد تغییرات ماهانه رطوبت خاک در عمق پنج سانتی‌متری بسیار شدید است. با افزایش عمق، تغییرات رطوبت خاک کم‌تر می‌شود. شدیدترین خشکسالی با مقدار ١/٥- در سال ١٩٩٧، ١٩٩٩ و ٢٠٠٨ رخ داده است و بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار شاخص‌های خشکسالی مطابق با تغییرات بارندگی و در سال‌های ١٩٨٢ و ٢٠٠٨ است. شاخص رطوبت خاک کم‌ترین ضریب

تعیین را با شاخص‌های خشکسالی دیگر و هم‌چنین با بارندگی و تبخیر نشان می‌دهد.

٤- نتیجه‌گیری

خشکسالی یک نوع از مخاطرات طبیعی است که نتایج و اثرات آن بر حوزه‌های اجتماعی- اقتصادی، منابع آب و کشاورزی می‌تواند به‌صورت یک فاجعه آشکار شود. به‌طور کلی شاخص‌های کاربردی میزان، مدت، شدت و یا میزان پوشش مکانی خشکسالی را توصیف می‌کنند. این شاخص‌ها براساس متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند بارش، دما، جریان آب رودخانه، رطوبت خاک، ذخیره مخزن و سطح آب زیرزمینی محاسبه می‌شوند (سن، ٢٠١٥). مواردی از آن‌ها را می‌توان به‌صورت یک شاخص واحد در مقیاس کمی، که اغلب شاخص خشکسالی نامیده می‌شوند ترکیب نمود. اگرچه شاخص‌های خشکسالی می‌توانند به سهولت به‌کار گرفته شوند، اما ماهیت علمی و کاربردی یک مقدار شاخص ممکن است سوالاتی را ایجاد کند (سن، ٢٠١٥). از جمله این‌که هر شاخص چگونه در ترکیب با سایر شاخص‌ها وزن‌دار می‌شود و مقدار شاخص به‌طور مطلق چگونه با ویژگی‌های آب و هواشناسی و آماری خشکسالی ارتباط پیدا می‌کند. در تحقیق حاضر ١٠ شاخص خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این بررسی‌ها نشان داد که شاخص SPI دارای مزیت نسبی بالایی برای پایش خشکسالی می‌باشد. شاخص‌ها ابزار مفیدی برای توصیف و مقایسه وقایع خشکسالی از نظر زمان‌بندی و پاسخ آن‌ها به یک سطح آستانه در شرایط تصادفی هستند. شاخص‌های مذکور اطلاعاتی را برای چالش‌های مدیریت خشکسالی فراهم می‌کنند؛ به شرطی‌که جنبه‌های کاربردی خشکسالی مانند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در کنار ویژگی‌های احتمالی، آماری و تصادفی شناخته شده باشد (سن، ٢٠١٥). اگرچه تعاریف بی‌شماری از خشکسالی در کاربردهای عملی وجود دارد، اما مهم‌ترین آن مربوط به تعادل عرضه و تقاضای منابع آب است؛ به‌عنوان مثال، کاهش تقاضا در صورتی‌که توالی و شدت (مقدار) کاهش طولانی‌تر و بیش‌تر از پاسخ به منابع آب عمومی باشد، ممکن است باعث خشکسالی شود. از آن‌جا که منابع آب، بهره‌برداری و الگوی مصرف آن‌ها از مکانی به مکان دیگر متفاوت است، روش‌های تعریف و محاسبه خشکسالی به‌عنوان شاخص‌های خشکسالی اشکال مختلفی دارند. خشکسالی‌هایی که معمولاً اتفاق می‌افتد شامل هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی هستند که هرکدام به‌صورت جداگانه یا مشترک بر جامعه و کنترل اقتصادی تأثیر می‌گذارند. از این‌رو، نتیجه ترکیبی به‌صورت خشکسالی اجتماعی-اقتصادی ظاهر می‌شود. شاخص‌های مختلف خشکسالی وجود دارد که هر یک از آن‌ها دارای مزایا و معایبی هستند (Al-Sefry و همکاران، ٢٠٠٤؛ سن، ٢٠١٥). در حالی که، شاخص جامع خشکسالی (RDI) در مقایسه با شاخص SPI حساسیت بیش‌تری به متغیرها و تغییرات آب و هوایی دارد. در این راستا می‌توان گفت که شاخص RDI بر اساس بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می‌شود ولی شاخص SPI فقط بر اساس بارندگی محاسبه می‌شود. شاخص RAI این قابلیت را دارد که خشکسالی را در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت (یک تا ٤٨ ماهه) مورد ارزیابی قرار دهد. از میان شاخص‌های مورد مطالعه شاخص PNPI به‌دلیل خطای زیاد برای ارزیابی خشکسالی پیشنهاد نمی‌شود؛ هم‌چنین شاخص DI نیز به‌دلیل این‌که به داده‌های طولانی‌مدت برای ارزیابی خشکسالی نیاز دارد، برای مناطق دارای ایستگاه‌های جدید با دوره آماری کوتاه‌مدت مناسب نیست. شاخص PDSI از داده‌های بارش، دما و رطوبت خاک محاسبه می‌شود و هر نوع بارش را به عنوان بارندگی در نظر می‌گیرد در این شاخص متوسط و یا میانگین بارش با میانه یکی نبوده که از معایب این شاخص است.

منابع

- اختری، ر.، مهدیان، م.ح.، مرید، س. ١٣٨٥. تحلیل مکانی شاخص‌های SPI و EDI در استان تهران. تحقیقات منابع آب ایران، دوره ٢، شماره ٣، ص ٢٧-٣٨.
- بذرافشان، ج.، شهبازی، س.، ایران‌نژاد، پ.، سهرابی، ت. ١٣٩٤. واسنجی شاخص شدت خشکسالی پالمر تحت شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک مناطق غرب و جنوب غرب ایران. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ٢٢، شماره ٥، ص ٤٤-٢٣.
- بهیار، م.ب.، پرنده خوزانی، ا. ١٣٨٦. بررسی آماری خشکسالی اصفهان. دانشگاه اصفهان (علوم انسانی)، دوره ٢٧، شماره ٦، ص ١٠٥-١٢٨.
- تاتینا، مرضیه؛ روشنی،محمود؛ بیگدلی، آتوسا (١٣٨٩). پایش و پهنه بندی خشکسالی در گیلان. مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، دوره ٥، شماره ١١، ص ٢٧-٤٦.
- تیموری، م.، فتح‌زاده، ع. ١٣٩٣. پایش شاخص منابع آب سطحی با استفاده از نمایه SWSI اصلاح‌شده و مدل زنجیره مارکف مطالعه موردی: حوزه آبخیز اترک. جغرافیا و توسعه، دوره ١٢، شماره ٣٤، ص ٩٩-١٠٧.
- جهانگیر، م.ح.، سارانی‌راد، م. ١٣٩٨. بررسی وضعیت خشک‌سالی در استان خراسان‌جنوبی توسط شاخص درصد بارش نرمال (PNPI) و شاخص روش استانداردسازی (Z). علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ٢١، شماره ٤، ص ٤٥-٥٩.
- جهانگیر، م.ح.، نوروزی، ا. ١٣٩٦. مقایسه عددی شاخص‌های هواشناسی RAI و PNPI به منظور ارزیابی و پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی در استان خوزستان. اکوهیدرولوژی، دوره ٤، شماره ٣، ص ٩٣٠-٩٢٣.
- حجابی، س.، ایران‌نژاد، پ.، بذرافشان، ج. ١٣٩٧. تعدیل شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) بر مبنای طرحواره برهمکنش جو- سطح خشکی (ALSIS) در حوضه آبریز کرخه. تحقیقات منابع آب ایران، دوره ١٤، شماره ٣، ص ١٧٠-١٨٣.
- رحیمی، د.، محمدی، ز. ١٣٩٦. بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سد زاینده رود. آمایش جغرافیایی فضا، ٧ (٢٥)، ٢٢١-٢٣٣.
- رضیئی، ط.، دانشکار آراسته، پ.، اختری، ر.، ثقیفیان، ب. ١٣٨٦. بررسی خشکسالی هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از شاخص SPI و مدل زنجیره‌ی مارکف. تحقیقات منابع آب ایران، دوره ٣، شماره ١، ص ٢٥-٣٥.
- رمضانی اعتدالی، ه.، لیاقت، ع.، پارسی‌نژاد، م. ١٣٩١. بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی بر اساس رطوبت خاک در ایستگاه سینوپتیک قزوین. پژوهش آب در کشاورزی، دوره ٢٦، شماره ١، ص ٨١-٩١.
- سرحدی، ع.، سلطانی، س.، مدرس، ر. ١٣٨٨. ارزیابی و تحلیل گستره خشکسالی در استان اصفهان بر پایه چهار شاخص مهم خشکسالی. منابع طبیعی ایران، دوره ٤، شماره ٦١، ص ٥٧٠-٥٧٥.
- سلطانی، س.، مدرس، ر. ١٣٨٥. تحلیل فراوانی و شدت خشکسالی هواشناسی استان اصفهان. منابع طبیعی ایران، ٥٩ (١)، ١٥-٢٦.
- شایق، ا.، سلطانی، س. ١٣٩٠. مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در استان یزد. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، دوره ١٥، شماره ٥٧، ص ٢٣١-٢٤٩.
- عزیزی، ق. ١٣٨٢. ارتباط خشکسالی‌های اخیر و منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین. پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ٣٥، شماره ٤٦، ص ١٣١-١٤٣.
- عطایی، ی.، قنبری، س.، فتوحی، ص. ١٣٩٩. تاثیر خشکسالی اقلیمی دودهه (١٣٩٠-١٣٧٠) برناپایداری توسعه در دهستان هشیوار شهرستان داراب. برنامه‌ریزی منطقه ای، دوره ١١، شماره ٢٤، ص ١٨٨-١٧٠.
- کارآموز، م.، عراقی‌نژاد، ش. ١٣٨٤. هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- کردوانی، پ. ١٣٨٠. خشکسالی و راه‌های مقابله با آن در ایران. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- محمدیان، آ.، کوهی، م.، آدینه‌بیگی، آ.، رسولی، ج.، بذرافشان، ب. ١٣٨٩. مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، DI و PNI و پهنه‌بندی آن‌ها، مطالعه موردی: استان خراسان شمالی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ١٧، شماره ١، ص ١٧٧-١٨٤.

- مساعدی، ا.، خلیلی‌زاده، م.، محمدی استادکلایه، ا. ١٣٨٧. پایش خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دوره ١٥، شماره ٢، ص ١٧٦-١٨٢.
- مسعودیان، س.ا. ١٣٩٠. آب و هوای ایران، چاپ اول، انتشارات شریعه توس، مشهد.
- مهدویان، ع.، جوانمرد، س. ١٣٨٤. نقش پیش‌آگاهی‌های هواشناسی در امنیت غذایی و کاهش ضایعات تولیدات کشاورزی. نامه فرهنگ، دوره ٥٧، ص ٩٦-١٠٣.
- نصری، م.، مدرس، ر. ١٣٨٦. تحلیل ناحیه‌ای خشکسالی منطقه اردستان بر اساس دو شاخص خشکسالی. پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، دوره ٢٠، شماره ٣، ص ١٦٧-١٧٦.
- نوروزی، ا.، محمدی، ز. ١٣٩٥. بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و آثار آن بر کشاورزی منطقه لنجان، برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، دوره ٢، شماره ٢، ص ٩٧-١١٦.
- یعقوب‌زاده، م.، احمدی، م.، سیدکابلی، ح.، زمانی، غ.، امیرآبادی‌زاده، م. ١٣٩٦. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص‌های ETDI و SPI. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ٢٤، شماره ٤، ص ٤٣-٦١.
- Alley, W.M. (١٩٨٤). The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions, Journal of Climate and Applied Meteorology, ٢٣(٧), ١١٠٠-١١٠٩.
- Al-Sefry, S.A., S¸en, Z., Al-Ghamdi, S.A., Al-Ashi, W.A., Al-Bardi, W.A. (٢٠٠٤). Strategic ground water storage of Wadi Fatimah, Makkah region. Technical report SGS-TR-٢٠٠٣-٢. Saudi Geological Survey, Jeddah, ١٦٨ pp.
- Aremu, J.K., & Olatunde, A.F. (٢٠١٢). Drought intensities in the sudano-sahelian region of Nigeria, Journal of Sustainable Society, ١(٤), ٨٨-٩٥.
- Babaei, H., Araghinejad, S., & Hoorfar, A. (٢٠١٣). Developing a new method for spatial assessment of drought vulnerability (case study: Zayandeh Rood River basin in Iran), Water and Environment Journal, ٢٧(١), ٥٠-٥٧.
- Bayissa, Y., Maskey, S., Tadesse, T., van Andel, S., Moges, S., van Griensven, A., & Solomatine, D. (٢٠١٨). Comparison of the Performance of Six Drought Indices in Characterizing ٣٦٩ Historical Drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia Geosciences, ٨(٣), ٨١.
- Bhalme, H.N., & Mooley, D.A. (١٩٨٠). Large Scale Droughts/Floods and Monsoon Circulation, Monthly Weather Review, ١٠٨(٨), ١١٩٧-١٢١١.
- Bhunia, P., Das, P., & Maiti, R. (٢٠٢٠). Meteorological Drought Study Through SPI in Three Drought Prone Districts of West Bengal, India, Earth Syst Environ, ٤(٣), ٤٣–٥٥.
- Bordi, I., & Sutera, A. (٢٠٠٤). Drought variability and its climatic implications, Global and Planetary Change, ٤٠(١-٢), ١١٥-١٢٧.
- Dai, A. (٢٠١١). Drought under global warming: a review, Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, ٢(١), ٤٥–٦٥.
- Dubrovsky, M., Svoboda, M.D., Trnka, M., Hayes, M.J., Wilhite, D.A., Zalud, Z., & Hlavinka, P. (٢٠٠٩). Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia, Theoretical and Applied Climatology, ٩٦(١-٢), ١٥٥–١٧١.
- Edwards, D.C., & McKee, T.B. (١٩٩٧). Characteristics of ٢٠th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Number ٩٧–٢, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins.
- Garen, D. (١٩٩٣). Revised surface Water Supply Index for western united states, Journal of Water Resources Planning and Management, ١١٩(٤).
- Gibbs, W.J., & Maher, J.V. (١٩٦٧). Rainfall Deciles as Drought Indicators, Bureau of Meteorology Bulletin, No.٤٨, Commonwealth of Australia, Melbourne.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (٢٠١٢). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, p. ٥٨٢.
- Javan, K., Azizzadeh, M., & Yousefi, S. (٢٠١٦). An Investigation and assessment of meteorological drought in Lake Urmia Basin using drought indices and probabilistic methods, Natural Environment Change, ٢(٢), ١٥٣-١٦٤.

- Karamouz, M., Rasouli, K., & Nazif, S. (٢٠٠٩). Development of a hybrid index for drought prediction: case study. Journal of Hydrologic Engineering, ١٤(٦), ٦١٧-٦٢٧.
- Karamouz, M.; S. Nazif, and A. Ahmadi. ٢٠١٣. Development of integrated drought evaluation and monitoring system: Case study of Aharchay River Basin, Journal of Hydrologic Engineering, ١٨(٧), ٨٩٧-٩١٠.
- Karamouz, M., Torabi, S., & Araghinejad, S. (٢٠٠٤). Analysis of hydrologic and agricultural droughts in central part of Iran, Journal of Hydrologic Engineering, ٩(٥), ٤٠٢-٤١٤.
- Karl, T.R., & Knight, R.W. (١٩٨٥). Atlas of Monthly Palmer Hydrological Drought Indices (١٩٣١-١٩٨٣) for the Contiguous United States, Historical Climatology Series ٣-٧, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- Keyantash, J., & Dracup, J.A. (٢٠٠٢). An evaluation of a drought, Bulletin of the American Meteorological Society, ٨٣(٨), ١١٦٧–١١٨٠.
- Mawdsley, J., Petts, G., & Walker, S. (١٩٩٤). Assessment of drought severity. British Hydrological Society, Occasional paper ٣.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (١٩٩٣). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Preprints of the ٨th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, ١٧٩–١٨٤.
- Mishra, A.K., & Singh, V.P. (٢٠١٠). A review of drought concepts. Journal of Hydrology, ٣٩١(١-٢), ٢٠٢–٢١٦.
- Mishra, A.k., Singh, V.P., & Desai, V.R. (٢٠٠٩). Drought characterization: a probabilistic approach, Stochastic Environ Research Risk Assess, ٢٣(١), ٤١–٥٥.
- Mo, K.C. (٢٠٠٨). Model-based drought indices over the United States, Journal of Hydrometeorology, ٩(٦), ١٢١٢–١٢٣٠.
- Montaseri, M., Amirataee, B., & Nawaz, R. (٢٠١٧). A Monte Carlo Simulation-based approach to evaluate the performance of three meteorological drought indices in Northwest of Iran, Water Resources Management. ٣١(٤), ١٣٢٣–١٣٤٢.
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (٢٠٠٦). Comparison of seven meteorological Indices for drought monitoring in Iran, International Journal of Climatology, ٢٦(٧), ٩٧١-٩٨٥.
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (٢٠٠٥). Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agriculture drought monitoring, Journal of Agriculture and Forest Meteorology, ١٣٣(١-٤), ٦٩-٨٨.
- Ntale, H.K., & Gan, T.Y. (٢٠٠٣). Drought indices and their application to East Africa, International Journal of Climatology, ٢٣(١١), ١٣٣٥-١٣٥٧.
- Oladipo, E.O. (١٩٨٥). A comparative performance analysis of there meterological drought indices, International Journal of Climatology, ٥, ٦٥٥–٦٦٤.
- Palmer, W.C. (١٩٦٥). Meteorological drought. U.S. Research Paper No. ٤٥. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, DC.
- Van Rooy, M.P. (١٩٦٥). A rainfall anomaly index (RAI), indeoendent of the time and space. Notos, ١٤, ٢٤–٤٣.
- Sadiq, A.A., Suleman, M.U., & Mohammed, U.B. (٢٠٢٠). An estimation of rainfall anomaly index and its impact on crop production in Yola and environs. African Journal of Environment and Natural Science Research, ٣(٤), ٣٥-٥٣.
- Sen, Z. (٢٠١٥). Applied Drought Modeling, Prediction, and Mitigation, Elsevier Science Publishing Co Inc, ٤٨٤p.
- Shafer, B.A., & Dezman, L.E. (١٩٨٢). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff area, Proc. Western Snow Conference, ١٦٤-١٧٥.
- Smith, D.I., Hutchinson, M.F., & McArthur, R.J. (١٩٩٣). Australian Climatic and Agricultural Drought: payments and policy, Drought Network News, ٥(٣), ١١-١٢.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (٢٠٠٤). Towards a Drought Watch System based on spatial SPI, Water Resources Management, ١٨(١), ١-١٢.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (٢٠٠٧). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), Water Resource Manage, ٢١, ٨٢١–٨٣٣.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (٢٠٠٥). Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. European Water, ٩(١٠), ٣-١١.
- Vangelis, H.; D. Tigkas, and G. Tsakiris. ٢٠١٣. The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. Journal of Arid Environments, ٨٨, ١٣٠-١٤٠.

- Vicek, O., & Huth, R. (٢٠٠٩). Is daily precipitation Gamma-distributed? Adverse effects of an incorrect use of the Kolmogorov–Smirnov test, Atmospheric Research, ٩٣(٤), ٧٥٩–٧٦٦.
- Wilhite, D. (١٩٩٧). Improving Drought Management in the West: The Role of Mitigation and Preparedness: Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission. Elusive Documents, Paper ٧١.
- Wilhite, D.A. (١٩٩٧). Responding to Drought: Common threads from the past, Vision for the future, Journal of the American Water Resources Association, ٣٣(٥), ٩٥١-٩٥٩.
- Wilhite, D.A., & Glantz, M.H. (١٩٨٥). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions, Water International. ١٠(٣), ١١١–١٢٠.
- Willeke, G., Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., & Guttman, N.B. (١٩٩٤). The National Drought Atlass, Institute for water resources report ٩٤- NDS-٤, U. S Army Corps of Engineers, ٥٨٢-٥٨٧.
- Willeke, K., Lin, X.J., & Grinshpun, S.A. (١٩٩٨). Improved aerosol collection by combined impaction and centrifugal motion. Aerosol Science and technology, ٢٨(٥), ٤٣٩–٤٥٦.
- Wu, H., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., Wilhite, D.A., & Wen, F. (٢٠٠٧). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons, International Journal of Climatology, l (٢٧), ٦٥–٧٩.
- Xu, J., Ren, L.L., Ruan, X.H., Liu, X.F., & Yuan, F. (٢٠١٢). Development of a physically based PDSI and its application for assessing the vegetation response to drought in northern China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, ١١٧(D٠٨), ١٠٦.
- Yan, D., Shi, X., Yang, Z., Li, Y., Zhao, K., & Yuan, Y. (٢٠١٣). Modified Palmer drought severity index based on distributed hydrological simulation, Mathematical Problems in Engineering, ٢٠١٣, ١-٨.
- Zoljoodi, M.; and A. Didevarasl. ٢٠١٣. Evaluation of spatialtemporal variability of drought events in Iran using Palmer drought severity index and its principal factors (through ١٩٥١-٢٠٠٥). Atmospheric and Climate Sciences, ٣(٢), ١٩٣-٢٠٧.

Indicators of estimating and assessing the meteorological and hydrological drought characteristics

Mohammad Pouralkhas Nokandeie[١], Vida Amanjahani[٢], Zeinab Hazbavi[٣], Raoof Mostafazadeh[٤*]

[١] M.Sc. in Watershed Management Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[٢] M.Sc. in Watershed Management Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[٣] Asisstant Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
[٤*] Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
*Email Address: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

Abstract

Introduction

Drought is one of the natural hazards whose consequences and effects on social, economic, water resources and agriculture can be significantly revealed. Although the occurrence of drought is inevitable, it can be planned by anticipating a reduction in its devastating effects on the economy, society and the environment. The purpose of this study was to explain the types of drought indicators and introducing the important and widely used indicators in assessing and quantifying meteorological and hydrological droughts. Meteorological drought is usually defined by the degree of dryness (compared to the normal or average value) and the duration of the dry period. Meteorological drought definitions should be considered separately for each specific region; Because the weather conditions that lead to deficit of rainfall vary from one region to another. Drought, in its meteorological sense, means a decrease in rainfall for a certain period of time on a specific area compared to the long-term average of the same area's rainfall in the same period of time.

Methodology

While introducing the benefits, limitations and scope of different drought classes, the relationships used by droughts are presented. Standardized precipitation indices (SPI), percentage of normal rainfall index (PNPI), rainfall anomaly index (RAI), Bhalme and Mooly drought index (BMDI), decile index (DI), evapotranspiration deficit index (ETDI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), reclamation drought index (RDI) and Soil Moisture Drought Index (SMDI) were introduced in the category of meteorological drought. In the category of hydrological drought, surface water supply indices (SWSI) were also examined.

Result and Discussion

Various drought indicators along with variables, time scales and their concepts are presented in the results section. The results showed that the SPI index has a high comparative advantage for monitoring meteorological drought. Also, RDI index is more sensitive to climatic variables than SPI index and PNPI index is not recommended for drought assessment due to high error. The standard precipitation index (SPI) is known as the most suitable index for drought analysis, especially spatial analysis, due to the simplicity of calculations, the use of available rainfall data, the ability to calculate for any desired time scale, and the very high ability to compare results spatially. Due to its simplicity and practicality, Rainfall Anomaly Index (RAI) has been often used in drought estimation to deal with drought in different stages for different climatic regions. The time scale for calculating this index is monthly and yearly. The calculation method of BMDI drought index is similar to Palmer's drought severity index and the index works recursively; That is, in calculating the drought intensity of a given month, a coefficient of the previous month's drought intensity is also considered. The DI index is defined as a rating of the amount of precipitation in a specific period of time and is presented in order to solve the deficiencies in the percentage of normal method. The Decimal Index provides a statistically accurate measure of precipitation, provided long-term climate data are available. The need for low input variables, including all components of water balance in index calculations, and comparability in different times and places are considered strengths of the PDSI index. This index is able to monitor drought in short-term and long-term periods (one to ٤٨ months). This index is increasing due to the need for low data, high sensitivity and high flexibility of its use; Due to the fact that the RDI index is calculated based on rainfall and potential evaporation and transpiration, it is more sensitive to climate variables and changes than drought indicators that are based only on rainfall (such as the standardized precipitation index). The purpose of the SWSI index is to obtain a standard for determining the amount of water available in mountainous areas and the possibility of comparing

different areas with each other. The SWSI index determines the severity of ongoing droughts in the region and the future situation can be predicted with the help of this index. SMDI drought index is an index that is based on the total soil moisture daily for one year and the only climatic factor used in it is soil moisture data.

Conclusion

A major part of Iran is located in dry and semi-arid areas, and the drought phenomenon is an inseparable part and is considered one of the characteristics of dry and semi-arid areas. Based on this, a two- to three-year drought period is experienced in the country almost every five years. These droughts have reduced surface and underground water sources and reduced usable water. The occurrence of drought and its continuation also affects the quantity and quality of ground water resources. The reduction of precipitation, which is one of the most important parameters of feeding the underground water aquifers, can cause the destruction and loss of the ground water aquifers. There are different drought indicators, each of which has advantages and disadvantages. Meanwhile, the Comprehensive Drought Index (RDI) is more sensitive to climate variables and changes compared to the SPI index. In this regard, it can be said that the RDI index is calculated based on rainfall and potential evaporation and transpiration, but the SPI index is only calculated based on rainfall. RAI index has the ability to evaluate drought in short-term and long-term time periods (one to ٤٨ months). Overall, a review of the indicators provided can help determine the appropriate indicator to assess drought. An appropriate indicator to provide information on drought management challenges. In addition, it quantifies the practical aspects of drought, such as the severity, duration, and frequency of drought, along with possible, and statistical characteristics. Among the studied indices, the PNPI index is not recommended for drought evaluation due to its high error; Also, the DI index is not suitable for areas having stations with a short-term data period because it requires long-term data to evaluate drought. The PDSI index is calculated from the data of precipitation, temperature and soil moisture and considers any type of precipitation as precipitation. In PDSI index, the average precipitation is not the same as the median, which is one of the disadvantages of this index.

Keywords

“Rainfall deficit”, “Drought intensity”, “Temporal scale”, “Suitable drought index”