

## طراحی فرآیند انتخاب شاخص مناسب بر مبنای پایش چندمعرفه خشکسالی در محدوده تعدادی از ایستگاه‌های ناحیه‌ی خشک و نیمه‌خشک ایران

محمد قبائی سوق<sup>۱</sup> - ابوالفضل مساعدی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۳

### چکیده

استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی منجر به نتایج متفاوتی می‌گردد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در پایش خشکسالی، انتخاب شاخصی متناسب با شرایط منطقه، به‌منظور دستیابی به نتایج قابل اعتماد است. در این تحقیق، ۸ شاخص مختلف پایش خشکسالی هواشناسی شامل: معیار بارندگی سالانه (SIAP)، دهک‌ها (DI)، درصد نرمال (PN)، ناهنجاری بارش (RAI)، بارش استاندارد شده تصحیح‌شده (SPI)\*، Z چینی (CZI)، Z-Score (ZSI) و RDI (Select)\* در ۵ ایستگاه سینوپتیک مشهد، تهران، تبریز، کرمانشاه و شیراز طی یک دوره‌ی آماری ۵۰ ساله محاسبه و بر اساس یک روش جدید چندمعرفه، شاخص یا شاخص‌های مناسب در مقیاس سالانه برای هر ایستگاه تعیین گردید. در روش چندمعرفه‌ی پیشنهاد شده که مبتنی بر سطوح آستانه‌ی چانگ و مدل اسکالوگرام می‌باشد ابتدا، به کمک ۵۰ متغیر هواشناسی مرتبط با بارش، تبخیر و تعرق و روزهای بارانی، رخدادهای خشکسالی و ترسالی با طبقه‌ی شدید و بسیار شدید برای ایستگاه‌های مورد بررسی تعیین گردید. سپس با معیار قرار دادن سال‌های مذکور به‌عنوان خشکسالی‌ها و ترسالی‌های مهم به انتخاب شاخص مناسب با استفاده از معیار آماری پیشنهاد شده با عنوان صحت کلی Total Accuracy (TA) اقدام گردید. نتایج نشان داد که در سه ایستگاه مشهد، تهران و شیراز شاخص RDI (Select)\* برترتیب با مقدار TA برابر با ۰/۴۶، ۰/۵۱ و ۰/۵۱ به‌عنوان شاخص مناسب، در ایستگاه تبریز سه شاخص SPI\*، CZI و ZSI با مقدار TA برابر با ۰/۸۸ و در ایستگاه کرمانشاه شاخص CZI با مقدار TA برابر با ۰/۶۴ به‌عنوان شاخص‌های مناسب برگزیده شدند.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های خشکسالی، شاخص مناسب، اسکالوگرام، سطوح آستانه، ایران

### مقدمه

که ممکن است منجر به نتایج متفاوتی گردند. شاخص PSDI شناخته شده‌ترین شاخص برای پایش خشکسالی کامل است، شاخص بارش استاندارد شده<sup>۳</sup> (SPI)، پرکاربردترین شاخص برای تعیین شدت و مدت خشکسالی است در حالی که اکثر برنامه‌ریزان منابع آب تمایل به استفاده از شاخص SWSI دارند (۷). دقت و صحت عملکرد شاخص‌های پایش خشکسالی متناسب با شرایط خاص مناطق و حوضه‌های مختلف قابل تردید است. به‌همین دلیل، یکی از چالش‌های اصلی در پایش خشکسالی تعیین شاخصی است که بر اساس هدف پایش، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشد

تلاش‌های زیادی جهت مقایسه‌ی شاخص‌های مختلف خشکسالی و انتخاب شاخص مناسب برای برخی از اهداف خاص پایش خشکسالی در مناطق مختلف جهان انجام شده‌است. ویو و همکاران (۲۲) سه شاخص SPI، Z چینی<sup>۴</sup> (CZI)، نمره‌ی Z<sup>۵</sup> (ZSI) را در چهار منطقه از کشور چین در بازه‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شاخص SPI را مبنا قرار داده و دو

شاخص‌های خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم پایش خشکسالی، عاملی تعیین‌کننده در پایش وضعیت خشکسالی و کمک به فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت خشکسالی می‌باشند (۱۷). شاخص‌های خشکسالی تعداد زیادی از داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی شامل بارندگی، حجم رواناب، برف پشته، سطح آب مخازن سطحی و زیرزمینی، رطوبت خاک و در برخی موارد دمای هوا را در نظر گرفته و پس از ترکیب این داده‌ها در قالب محاسبات خاص، نتیجه را به‌صورت تصویر قابل درکی از شرایط موجود و معمولاً با یک عدد بیان می‌کنند که این عدد به‌منظور استفاده در فرآیند تصمیم‌سازی، موثرتر و کاراتر از داده‌های خام خواهد بود (۷ و ۱۷).

برای پایش خشکسالی از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و

منابع طبیعی، گرگان

۲- دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: mosaeedi@um.ac.ir)

\*- نویسنده مسئول:

3- Standardized precipitation Index

4- China Z Index

5- Z-Score Index

پایش خشکسالی هواشناسی معرفی نمودند. انصافی مقدم (۳) با استفاده از فرضیه‌ی اول خلیلی و بذرافشان (۵)، کارایی شاخص‌های SPI، ZSI، PN و DI را در ۳۴ ایستگاه منتخب حوضه‌ی دریاچه نمک طی یک دوره ۴۴ ساله مورد ارزیابی قرار داد. نتایج وی در مقیاس سالانه نشان داد که شاخص‌های SPI و DI مقارن با سال وقوع کمینه بارندگی، رخداد خشکسالی شدید و بسیار شدید را در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داده و کارایی بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارند. مرعشی (۱۱) با انجام تحلیل آماری بر مبنای توزیع نرمال، از میان ۵ شاخص SPI، DI، CZI، ZSI و PN شاخص SPI را به‌عنوان شاخص برتر برای ایستگاه‌های واقع در استان گلستان و منطقه‌ی سیستان معرفی نمود.

بررسی سوابق تحقیق مرتبط با انتخاب شاخص مناسب خشکسالی نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات صورت گرفته از شاخص SPI به‌دلیل سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه در مقیاس‌های زمانی دلخواه و قابلیت زیاد در مقایسه‌ی مکانی نتایج (۱ و ۲) استفاده شده است و تاکنون روش یگانه‌ای مبتنی بر علم آمار جهت انتخاب شاخص مناسب ارائه نشده است. دلیل این امر نبود مقادیر اندازه‌گیری شده از خشکسالی در سال‌های مختلف است که سبب می‌شود مقایسه‌ی شاخص‌های مختلف و انتخاب شاخص برتر دشوار به‌نظر رسد. کوئیرینگ و پاپاکریاکو (۱۹) با بررسی مقدار نوسانات تولید گندم طی سال‌های مختلف به انتخاب شاخص مناسب خشکسالی کشاورزی پرداختند. به‌نظر می‌رسد در این روش تغییرات سطح کشت و توسعه‌ی ادوات کشاورزی جهت بهره‌وری بیشتر نادیده گرفته شده است که هرکدام از عوامل ذکر شده می‌تواند سبب افزایش چشم‌گیری در میزان تولید محصول شوند که متاثر از سال‌های تر و خشک نمی‌باشند.

در مدل‌های تک‌معرفه پایش خشکسالی، با استفاده از آمار طولانی مدت یک پارامتر هواشناسی (مقدار بارش) یا هیدرولوژیکی (آورد رودخانه یا نوسانات سطح آب زیرزمینی) به پایش دوره‌های ترسالی و خشکسالی می‌پردازند (۱۲). با توجه به این که بروز پدیده خشکسالی تحت تاثیر نوسانات عوامل اقلیمی مختلف می‌باشد و نوسانات هر یک از این متغیرها می‌توانند سبب افزایش یا کاهش شدت این پدیده گردد، در سال‌های اخیر برخی محققان از مدل چندمعرفه برای بررسی این پدیده استفاده نموده‌اند. چانگ (۱۴) با استفاده از ۵ معرف شامل جریان رودخانه، بارندگی، دما، سطح آب زیرزمینی و سطح آب در مخازن روشی چند معرفه را برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی ارائه داد (۱۲). مرید و پایمزد (۱۲) با استفاده از معرف‌های هیدرولوژیکی چانگ (۱۴)، به پایش روزانه خشکسالی در سطح استان تهران طی سال‌های آبی ۷۸-۱۳۷۷ الی ۸۰-۱۳۷۹ پرداختند و نتایج آن را با نتایج شاخص EDI که دارای مقیاس روزانه می‌باشد مقایسه نمودند. آن‌ها ضمن تأیید قابلیت‌های روش چانگ و

شاخص دیگر را طی سال‌های خشک و مرطوب با استفاده از روش همبستگی خطی نسبت به شاخص SPI مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب همبستگی بین مقادیر شاخص‌های CZI و ZSI با SPI از سطح معنی‌داری قابل قبولی برخوردار است و در مقیاس‌های زمانی مختلف رابطه‌ی مناسبی با هم دارند. هم‌چنین بر پایه‌ی نتایج آن‌ها، شاخص ZSI شرایط موجود را مرطوب‌تر و شاخص CZI شرایط بسیار خشک را بهتر از شاخص SPI نشان می‌دهد.

کوئیرینگ و پاپاکریاکو (۱۹) در تحقیقی به ارزیابی ۴ شاخص خشکسالی کشاورزی PDSI، Z (مشتق شده از شاخص پالمر)، SPI و NOAA در ۴۳ منطقه از غرب کانادا جهت تعیین مناسب‌ترین آن‌ها به‌منظور پیش‌بینی محصول گندم بهار پرداختند. آن‌ها با استفاده از آمار سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۶۰، مجموعه‌ای از روابط رگرسیونی خطی بین مقدار محصول تولیدی گندم و مقادیر شاخص‌های مختلف در هر منطقه ایجاد نمودند. سپس دقت هر مدل در پیش‌بینی مقادیر گندم تولیدی طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۹ را با استفاده از معیارهای آماری خطا، ارزیابی و مناسب‌ترین شاخص را انتخاب نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها، مناسب‌ترین شاخص خشکسالی کشاورزی در این منطقه، شاخص Z می‌باشد و دارای ارتباطی قوی با مقدار تولید محصول گندم بهار است. خلیلی و بذرافشان (۵) با استفاده از مقادیر بارش ۹ ایستگاه سینوپتیک ایران، کارایی هفت شاخص خشکسالی هواشناسی معیار بارندگی سالانه<sup>۱</sup> (SIAP)، دهک‌ها<sup>۲</sup> (DI)، SPI، درصد نرمال<sup>۳</sup> (PN)، شاخص خشکسالی موثر<sup>۴</sup> (EDI) و ناهنجاری بارش<sup>۵</sup> (RAI) را در مقیاس سالانه بر مبنای دو فرضیه‌ی: ۱- کمینه مقدار بارندگی طی یک دوره‌ی بلند مدت اقلیمی منعکس کننده‌ی خشکسالی هواشناسی شدید یا بسیار شدیدی است که در منطقه‌ی تحت بررسی اتفاق افتاده است. ۲- هرچه میزان همبستگی بین نمایه‌های کیفی خشکسالی و ناهنجاری بارش طی دوره آماری بیشتر باشد کارایی آن‌ها برای اهداف هواشناسی بیشتر است را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمون فرضیه‌ها در سرجمع ایستگاه‌ها نشان داد که شاخص‌های SIAP و DI مقارن با سال وقوع کمینه بارندگی رخداد خشکسالی بسیار شدید را در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی نشان دادند. هم‌چنین بررسی میانگین و انحراف معیار ضریب همبستگی رتبه‌ای شاخص‌ها با نوسانات بارندگی در سرجمع ایستگاه‌ها نشان داد که شاخص SIAP از میانگین بالاتر و انحراف معیار کمتری نسبت به سایر شاخص‌ها برخوردار است. آن‌ها بر اساس دو فرضیه‌ی فوق، شاخص SIAP را به‌عنوان شاخصی کارآمد برای

- 1- Standardized Index annual precipitation
- 2- Deciles
- 3- Percent of Normal Precipitation Index
- 4- Effective Drought Index
- 5- Rainfall Anomaly Index

تعیین می‌نماید.

## مواد و روش‌ها

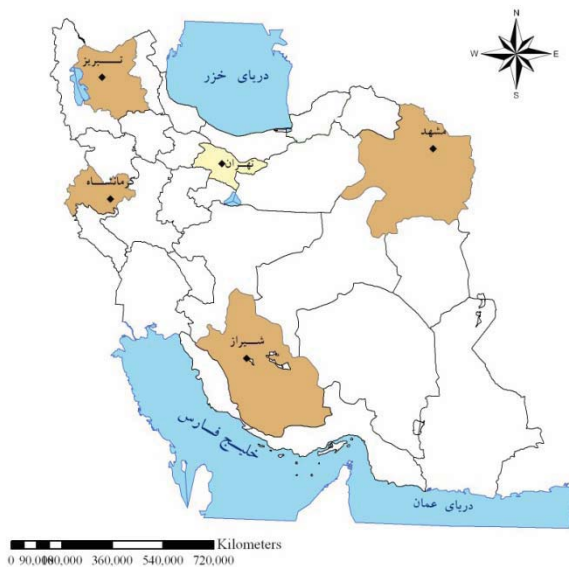
### موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های مورد بررسی

در این تحقیق از آمار روزانه‌ی مقدار بارش و ماهانه‌ی پارامترهای هواشناسی (دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد) در ۵ ایستگاه سینوپتیک مشهد، تهران، تبریز، کرمانشاه و شیراز طی یک دوره‌ی آماری ۵۰ ساله (از سال آبی ۱۹۵۷-۵۸ تا سال آبی ۲۰۰۶-۰۷) استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های ناقص در سری‌های ماهانه‌ی بارندگی و دماهای حداقل و حداکثر ایستگاه‌های تبریز و شیراز با استفاده از آمار ایستگاه‌های سینوپتیک مراغه و فسا از روش نسبت‌ها بازسازی گردید و در ایستگاه کرمانشاه (سال ۱۹۶۲) به‌علت آن‌که در مجاورت آن‌ها ایستگاهی با طول دوره‌ی آماری طولانی مدت که بتواند این سال را پوشش دهد وجود نداشت، سال مذکور از روند محاسبات حذف گردید. در این تحقیق مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی در ماه‌هایی که دارای آمار کامل پارامترهای هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد بودند از روش استاندارد فائو پنمن - مانیتث (FPM) محاسبه گردید و در سایر ماه‌ها که فاقد یک یا چند پارامتر از پارامترهای هواشناسی مورد نیاز این روش استاندارد بودند با توجه به نوع کمبود، بر اساس معیارهای آماری خطا، مقدار  $ET_0$  از بهترین معادله (شامل ۱۱ معادله‌ی تجربی و تخمینی واسنجی شده) برآورد گردید (۸).

اهمیت دخالت معرف‌های هیدرولوژیکی در پایش خشکسالی، نشان دادند که روش چانگ از حساسیت بیشتری به کمبود منابع آبی در شرایط خشکسالی برخوردار می‌باشد. براتیان (۴) با انتخاب ده پارامتر اقلیمی به‌عنوان عوامل موثر بر خشکسالی به کمک مدل اسکالوگرام سال‌های خشک و مرطوب ایستگاه شهرکرد را تعیین نمود. کریمی - نظر و همکاران (۱۰) با بیان این‌که تبخیر و تعرق پتانسیل می‌تواند در بردارنده‌ی عواملی چون دما، رطوبت نسبی و سرعت باد باشد، سه پارامتر بارش سالانه، تعداد روزهای بارانی و تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه را به‌عنوان عوامل مستقل موثر بر خشکسالی منطقه‌ی زابل در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که در طول دوره‌ی مورد بررسی، خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال‌ها به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۷۱ به وقوع پیوسته‌اند. آن‌ها بیان داشتند که در این منطقه، همیشه کم بارش‌ترین سال مصادف با شدیدترین خشکسالی نمی‌تواند باشد و نقش عوامل دیگر نیز در این میان موثر خواهد بود.

یکی از راهکارهای کسب اطمینان از انتخاب شاخص مناسب، ارزیابی شاخص‌های مختلف خشکسالی و مقایسه‌ی نتایج حاصل، با شرایط حاکم بر یک خشکسالی تاریخی می‌باشد (۱۸). ولی آیا ارزیابی شاخص مناسب تنها با یک شاهد امکان‌پذیر می‌باشد؟ خشکسالی‌های تاریخی چگونه باید استخراج گردند؟

انتخاب شاخص مناسب به‌منظور پایش خشکسالی، فرآیندی حساس، پیچیده و وابسته به شرایط متعدد می‌باشد. از این رو این تحقیق، با تعیین هدف ارزیابی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی فرآیند انتخاب شاخص مناسب را بر مبنای این هدف، طراحی و شاخص و یا شاخص‌های مناسب را در مقیاس سالانه در محدوده‌ی ایستگاه‌های سینوپتیک مشهد، تهران، تبریز، کرمانشاه و شیراز که همگی در محدوده‌ی آب و هوایی خشک و نیمه خشک قرار دارند،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی در گسترده‌ی ایران

## شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی

در این تحقیق از ۸ شاخص مختلف خشکسالی هواشناسی شامل: SIAP، DI، PN، RAI، SPI، CZI، ZSI و RDI استفاده شده است. خلیلی (۵) به منظور بررسی روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در گستره‌ی ایران شاخص SIAP را ارائه داد. گیسی و موهر (۱۹۶۷) شاخص DI را ارائه نمودند. در این شاخص وقوع بارندگی‌های طولانی مدت در دهک‌هایی از توزیع نرمال تقسیم می‌گردد و دارای محاسبات نسبتاً ساده‌ای است، ولی برای استفاده از آن به آمار بلندمدت نیاز می‌باشد (۲۰). شاخص PN توسط ویلیک و همکاران در سال ۱۹۹۴ به منظور پایش خشکسالی هواشناسی ارائه گردید و از تقسیم مقدار بارندگی در یک دوره‌ی مشخص بر مقدار نرمال بارندگی آن دوره محاسبه می‌شود. هایس (۱۶) اصلی‌ترین حسن آن را محاسبات بسیار ساده و مناسب برای آگاهی عموم از وضعیت خشکسالی در مقیاس محلی و فصلی بیان نمود. شاخص ZSI توسط تریولا در سال ۱۹۹۵ برای پایش خشکسالی هواشناسی ارائه گردید (۲۲). در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به علت این که ضریب تغییرات بارندگی بالاست و داده‌ها نیز از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند استفاده از این روش باعث می‌شود که ماه‌های خشک کم اهمیت و در عوض ماه‌های مرطوب بسیار اغراق آمیز نشان داده شوند (۶). شاخص RAI در سال ۱۹۶۵ توسط وان روی ارائه شد. در مناطقی که دارای بارندگی نامنظم هستند از این شاخص می‌توان برای ارتباط دادن ناهنجاری‌های بارش به خشکسالی استفاده نمود. تنها عامل مؤثر در محاسبه‌ی این شاخص، بارش می‌باشد و در دو مقیاس زمانی ماهانه و سالانه به کار می‌رود (۵). شاخص SPI عبارتست از متغیری از تابع توزیع نرمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظر از توزیع گامای بدست آمده، مساوی باشد. طبق این روش دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد (۱، ۱۵ و ۱۸). در شاخص CZI فرض بر این است که داده‌های بارندگی از توزیع پیرسون III تبعیت کنند (۲۲). ساکرسی (۲۱) با بهره‌گیری از مفاهیم ساختار توسعه‌ی شاخص SPI، از نسبت میزان بارش به تبخیر و تعرق شاخص جدید RDI را معرفی نمود. وی بیان می‌دارد معمولاً خشکسالی‌هایی که در منطقه‌ی مدیترانه به‌وقوع می‌پیوندد با افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تعرق همراه هستند، بنابراین بارش به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر خصوصیات خشکسالی در این مناطق باشد.

در این تحقیق شاخص SPI\*، همان SPI می‌باشد که با برآزش مناسب‌ترین تابع توزیع بر داده‌های بارش به جای تابع توزیع پیش-فرض (گاما) اصلاح شده است (۱۳). شاخص (Select) RDI\* نیز همان شاخص RDI است که بر اساس انتخاب مناسب‌ترین تابع

توزیع نسبت بارش به تبخیر و تعرق به جای تابع توزیع پیش‌فرض (لگ‌نرمال) و مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق به جای روش پیش‌فرض (تورنت‌وایت) اصلاح شده است (۸). برای انجام این تصحیح ابتدا، مناسب‌ترین تابع توزیع مقادیر بارندگی (شاخص SPI) و نسبت بارندگی به تبخیر و تعرق (شاخص RDI) با استفاده از آزمون نکوئی برآزش کلموگروف-اسمیرنوف تعیین گردید. سپس با استخراج پارامترهای مناسب‌ترین تابع توزیع مقدار احتمال تجمعی آن محاسبه گردید. آن‌گاه با استفاده از اصل انتقال هم‌احتمال (۹) مقدار متناظر با هر مقدار بارندگی (شاخص SPI) و نسبت بارندگی به تبخیر و تعرق (شاخص RDI) در توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده (میانگین صفر و انحراف از معیار یک) تعیین شد که همان مقادیر شاخص‌های SPI و RDI اصلاح شده‌اند.

به منظور مقایسه‌ی هم‌زمان شاخص‌های مختلف خشکسالی با یکدیگر، تعداد طبقات وضعیت‌های رطوبتی در شاخص‌های مختلف باید با یکدیگر برابر باشند. به این منظور ۷ وضعیت رطوبتی ترسالی بسیار شدید، ترسالی شدید، ترسالی متوسط، نرمال، خشکسالی متوسط، خشکسالی شدید و خشکسالی بسیار شدید جهت تحلیل روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها انتخاب شده است. نتایج هر یک از وضعیت‌های خشکسالی به طبقه‌های ۷ بازه‌ای تبدیل شده است که محدوده‌ی هر یک از شاخص‌های انتخابی جهت تبدیل به ۷ وضعیت رطوبتی در جدول ۱ آورده شده است.

## مدل پایش چندمعرفه‌ی اسکالوگرام

مدل اسکالوگرام یک مدل چندمعرفه می‌باشد که در دهه‌های گذشته بیشتر در موارد اقتصادی به کار گرفته شده است. این مدل به دلیل عدم محدودیت در تعداد عوامل و نوع آن‌ها و هم‌چنین دوره‌ی آماری، قابلیت تعمیم به بسیاری از مباحث مربوط به اقلیم مانند: طبقه‌بندی اقلیمی، تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی و ... را دارد (۱۰). به‌طور کلی در طراحی مدل اسکالوگرام چهار مرحله‌ی مشخص وجود دارد که عبارتند از: تعیین عوامل مؤثر بر پدیده‌ی مورد بررسی، انجام محاسبات آماری، ارزش‌گذاری و رتبه‌بندی (۴).

در مدل اسکالوگرام هر محقق بنا به نظر کارشناسی خویش و امکان دستیابی به اطلاعات هواشناسی می‌تواند تعداد عوامل و دوره‌ی آماری را تغییر دهد. در این روش عوامل مؤثر با توجه به نوع تأثیری که بر پدیده‌ی مورد بررسی دارند، به‌صورت مثبت یا منفی ارزش‌گذاری می‌شوند. در محاسبات آماری مدل اسکالوگرام، ابتدا میانگین ( $\bar{x}$ ) و انحراف معیار ( $\sigma$ ) هر یک از متغیرها محاسبه می‌شوند. آن‌گاه برحسب میزان هم‌خوانی و دامنه‌ی میانگین‌ها، مقدار K معادل  $0.25$  و  $0.5$  (۱۰)، یا  $1/2$  و  $1/4$  (۴)، بر اساس نظر کارشناسی انتخاب می‌شود. سپس با توجه به مقادیر  $k\sigma \pm \bar{x}$ ، ۳ محدوده‌ی برای وقوع هر یک از متغیرها در هر سال محاسبه می‌شود (جدول ۲).

جدول ۱- طبقات مختلف شدت‌های خشکسالی و ترسالی در شاخص‌های مورد بررسی

شاخص	SIAP	DI	PN	RAI	RDI و SZI، CZI، SPI
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۱/۲۸	بیشتر از ۹۰ درصد	بیشتر از ۱۶۰ درصد	بیشتر از ۳	۲ یا بیشتر
ترسالی شدید	۱/۲۸ تا ۰/۸۴	۸۰ تا ۹۰ درصد	۱۴۵ تا ۱۶۰ درصد	۲/۱ تا ۳	۱/۵۰ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۰/۸۴ تا ۰/۵۲	۷۰ تا ۸۰ درصد	۱۳۰ تا ۱۴۵ درصد	۱/۲ تا ۲/۱	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	۰/۵۲ تا -۰/۵۲	۳۰ تا ۷۰ درصد	۷۰ تا ۱۳۰ درصد	۱/۲ تا -۱/۲	۰/۹۹ تا -۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۰/۵۲ تا -۰/۸۴	۲۰ تا ۳۰ درصد	۵۵ تا ۷۰ درصد	-۲/۱ تا -۱/۲	-۱/۴۹ تا -۱
خشکسالی شدید	-۱/۲۸ تا -۰/۸۴	۱۰ تا ۲۰ درصد	۴۰ تا ۵۵ درصد	-۳ تا -۲/۱	-۱/۹۹ تا -۱/۵۰
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۱/۲۸	کمتر از ۱۰ درصد	کمتر از ۴۰ درصد	کمتر از -۳	-۲ یا کمتر

منابع محاسبه‌ی شاخص‌ها در جدول فوق شامل: شاخص‌های SIAP و RAI (۵)، شاخص DI (۲۰)، شاخص PN (۱۶)، شاخص SPI (۱۵)، شاخص -های CZI و ZSI (۲۲) و شاخص RDI (۲۱) می‌باشند.

جدول ۲- چگونگی تعیین طیف‌های ارزشی عوامل هواشناسی مؤثر بر تنش‌های خشکسالی

طیف‌های ارزشی		معادله
عواملی که با افزایش آن‌ها تنش‌های خشکسالی کاهش می‌یابد	عواملی که با افزایش آن‌ها تنش‌های خشکسالی افزایش می‌یابد	
مثبت	منفی	$x_i \geq \bar{x} + k\sigma$
خنثی	خنثی	$\bar{x} - k\sigma \leq x_i \leq \bar{x} + k\sigma$
منفی	مثبت	$x_i \leq \bar{x} - k\sigma$

شدید در مدل چندمعرفه‌ی اسکالوگرام تعیین و به‌عنوان مبنا قرار داده شوند و سایر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی بر مبنای آن‌ها مقایسه کردند و بر اساس معیار آماری پیشنهاد شده شاخص و یا شاخص‌های مناسب در ایستگاه‌های مورد بررسی در مقیاس سالانه انتخاب شوند.

به مرور زمان و افزایش درک بشر از پدیده‌ی خشکسالی، تلاش‌های مختلفی برای دخالت دادن عواملی علاوه بر بارندگی برای توصیف این پدیده آغاز گردید. در مناطق مختلف آب و هوایی به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، بالا بودن میزان تبخیر و تعرق و تمرکز بارش در محدوده‌ی کوتاهی از سال، سبب افزایش اثرات تنش‌های کم‌آبی در سال‌های خشک می‌گردد. در نتیجه، در این مناطق بارندگی به تنهایی نمی‌تواند توصیف مناسبی از خشکسالی ارائه دهد. از طرفی به‌نظر می‌رسد چگونگی توزیع زمانی بارندگی در طول سال، فواصل زمانی بین روزهای بارانی و تعداد روزهای متوالی بدون باران می‌تواند به توصیف خشکسالی هواشناسی و تا حدودی کشاورزی کمک شایانی نمایند. از این‌رو در این تحقیق از ۵۰ متغیر مرتبط با بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و روزهای بارانی در قالب مدل اسکالوگرام استفاده شده است. متغیرهای مؤثر بر تنش‌های خشکسالی جهت تعیین رخدادهای ترسالی و خشکسالی که در این تحقیق پیشنهاد شده‌است، در جدول ۳ ارائه شده است.

در مرحله‌ی ارزش‌گذاری بر اساس محاسبات آماری مرحله‌ی قبل، داده‌ها در سه طیف ارزشی مثبت، خنثی و منفی ارزش‌گذاری می‌شوند که ملاک این تقسیم‌بندی، حاصل  $\bar{x} \pm k\sigma$  داده‌ها است. برای مثال در خصوص عواملی که افزایش آن‌ها (مقدار بارندگی) سبب کاهش تنش‌های خشکسالی می‌شوند، موارد بیشتر از  $\bar{x} + k\sigma$  در طیف مثبت و موارد کمتر از  $\bar{x} - k\sigma$  در طیف منفی قرار می‌گیرند. در مورد عواملی که افزایش آن‌ها (تبخیر و تعرق) سبب افزایش تنش‌های خشکسالی می‌شوند، موارد بیشتر از  $\bar{x} + k\sigma$  در طیف منفی و موارد کمتر از  $\bar{x} - k\sigma$  در طیف مثبت قرار می‌گیرند (۴ و ۱۰).

جدول ۲ چگونگی تعیین طیف‌های ارزشی عوامل مؤثر بر تنش‌های خشکسالی را نشان می‌دهد. در مرحله‌ی رتبه‌بندی، شدت خشکسالی و ترسالی هر یک از سال‌های آماری، بر اساس حاصل جمع تعداد موارد مثبت، خنثی و منفی مشخص می‌گردد.

### انتخاب شاخص مناسب بر اساس سطوح آستانه‌ی چانگ و مدل اسکالوگرام

در این بخش به تبیین روش جدید پیشنهادی مبتنی بر سطوح آستانه‌ی چانگ (۱۴) و مدل چندمعرفه‌ی اسکالوگرام جهت انتخاب شاخص مناسب پرداخته می‌شود. مشکلات ناشی از عدم وجود شاخص مبنا برای مقایسه‌ی شاخص‌های مختلف، سبب شد که در این تحقیق رخدادهای خشکسالی و ترسالی با طبقه‌ی شدید و بسیار

جدول ۳- متغیرهای پیشنهادی مؤثر بر تنش‌های خشکسالی در مدل اسکالوگرام جهت تعیین رخدادهای

متغیر	علامت اختصاری
مقدار بارش سالانه	X <sub>1</sub>
مقدار بارش فصل پائیز	X <sub>2</sub>
مقدار بارش فصل زمستان	X <sub>3</sub>
مقدار بارش فصل بهار	X <sub>4</sub>
مقدار بارش در هریک از ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و ژوئن	X <sub>13</sub> تا X <sub>5</sub>
بیشترین مقدار بارش ماهانه فصل پائیز	X <sub>14</sub>
کمترین مقدار بارش ماهانه فصل زمستان	X <sub>15</sub>
بیشترین مقدار بارش ماهانه فصل زمستان	X <sub>16</sub>
بیشترین مقدار بارش ماهانه فصل بهار	X <sub>17</sub>
حداکثر مقدار بارش ۲۴ ساعته در سال	X <sub>18</sub>
مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه	X <sub>19</sub>
مقدار تبخیر و تعرق در هریک از ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و ژوئن	X <sub>28</sub> تا X <sub>20</sub>
مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل فصل پائیز	X <sub>29</sub>
مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل فصل زمستان	X <sub>30</sub>
مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل فصل بهار	X <sub>31</sub>
تعداد روزهای بارانی در سال	X <sub>32</sub>
تعداد روزهای بارانی با بیش از یک میلی‌متر بارش در طول سال	X <sub>33</sub>
تعداد روزهای بارانی با بیش از ۵ میلی‌متر بارش در طول سال	X <sub>34</sub>
تعداد روزهای بارانی با بیش از ۱۰ میلی‌متر بارش در طول سال	X <sub>35</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی بدون باران در طول سال	X <sub>36</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی بدون باران در فصل پائیز	X <sub>37</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی بدون باران در فصل زمستان	X <sub>38</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی بدون باران در فصل بهار	X <sub>39</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی بدون باران در هریک از ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و ژوئن	X <sub>48</sub> تا X <sub>40</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی با بارش کمتر یا مساوی یک میلی‌متر در سال	X <sub>49</sub>
بیشترین تعداد روزهای متوالی با بارش کمتر یا مساوی ۵ میلی‌متر در سال	X <sub>50</sub>

توضیح: در جدول فوق منظور از سال، سال آبی (مجموع مقدار هریک از پارامترها طی ۹ ماه: اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و ژوئن)، فصل‌های پائیز (ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر)، زمستان (ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس) و بهار (ماه‌های آوریل، می و ژوئن) می‌باشد.

برای هر یک از متغیرها، داده‌های مشاهداتی به‌طور صعودی مرتب و سطح آستانه‌ی  $X$  درصد، مقداری است که مربوط به موقعیت  $N$ ام داده‌های مرتب شده با تعداد  $N$  می‌باشد. این مقدار برای عوامل مؤثر بر خشکسالی که افزایش آن‌ها سبب کاهش تنش‌های خشکسالی می‌شوند از رابطه‌ی ۱ و برای عوامل مؤثر بر خشکسالی که افزایش آن‌ها سبب افزایش تنش‌های خشکسالی می‌شوند از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌گردد.

$$i = \frac{(100 - X)}{100} N \quad (1)$$

$$i = \frac{X}{100} N \quad (2)$$

مفهوم روابط فوق بدین معناست که در سطح آستانه‌ی مورد نظر،  $X$  درصد داده‌های ثبت‌شده (متغیرهای سبب کاهش خشکسالی) از آن

نوع تأثیر هر یک از متغیرهای هواشناسی ذکر شده در جدول ۳، بر افزایش یا کاهش اثرات تنش‌های خشکسالی به شرح زیر می‌باشند: در متغیرهای مرتبط با بارش (متغیرهای  $X_1$  تا  $X_{18}$ ) با افزایش مقدار آن‌ها اثرات تنش‌های خشکسالی کاهش می‌یابند. هم‌چنین در متغیرهای مرتبط با تبخیر و تعرق پتانسیل (متغیرهای  $X_{19}$  تا  $X_{31}$ ) افزایش مقدار آن‌ها سبب افزایش مقدار تنش‌های خشکسالی می‌گردند. اما در ارتباط با تعداد روزهای بارانی، افزایش تعداد روزهای بارانی (متغیرهای  $X_{32}$  تا  $X_{35}$ ) سبب کاهش و بیشترین تعداد روزهای متوالی بدون باران (متغیرهای  $X_{36}$  تا  $X_{50}$ ) سبب افزایش اثرات تنش‌های خشکسالی می‌گردند.

برای تعیین سطوح خشکسالی متغیرهای هواشناسی از روش سطح آستانه‌ی معرف‌های چانگ (۱۴) استفاده گردید. بدین منظور

تعیین نوع تاثیر هر یک از متغیرهای هواشناسی بر تنش‌های خشکسالی مطابق معادلات ۱ و ۲، سطوح آستانه‌ی طیف‌های ارزشی مثبت، خنثی و منفی در هر متغیر تعیین گردید. سپس برای هر متغیر با توجه به طیف‌های ارزشی تعیین شده و مقدار آن در هر سال، یکی از مقادیر ۱، ۰ و ۱- به آن اختصاص داد شد. با توجه به مقادیر ارزش‌گذاری شده برای هر متغیر هواشناسی، امتیاز هر سال از جمع ارزش عوامل هواشناسی در آن سال محاسبه شده است. بر اساس مدل تعریف شده، حداکثر امتیازی که یک سال می‌تواند به خود اختصاص دهد ۵۰ و حداقل آن ۵۰- می‌باشد که هر چه مقدار امتیازات مثبت در سالی بیشتر باشد نشان‌دهنده‌ی سالی با ویژگی ترسالی شدیدتر می‌باشد و بر عکس.

با برآزش توزیع‌های مختلف (شامل توزیع‌هایی که از پایین و بالا نامحدودند) بر حاصل جمع ارزش‌های هواشناسی سال‌های مختلف، بر اساس آماره‌ی نکویی برآزش K.S، بهترین تابع توزیع انتخاب و تابع احتمال تجمعی آن محاسبه شد. در ادامه با استفاده از اصل احتمال هم‌انتقال (۹) به شیوه‌ی معکوس، مقادیر متناظر با ارزش عوامل هواشناسی در توزیع نرمال استاندارد شده محاسبه و با استفاده از طبقه‌بندی ارائه شده برای شاخص SPI (۱۵) طبقه‌های مختلف خشکسالی در مدل اسکالوگرام تعیین گردید. نتایج حاصل از برآزش توزیع‌های مختلف آماری بر مجموع ارزش عوامل هواشناسی سال-های مختلف در ایستگاه‌های مورد بررسی به همراه پارامترهای آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

### نتایج تعیین رخداد‌های ترسالی و خشکسالی در مدل اسکالوگرام

در شکل ۲ نتایج رخداد‌های خشکسالی و ترسالی استخراج شده بر اساس مدل اسکالوگرام به همراه مقادیر بارش و مجموع امتیازات حاصل از ارزش‌گذاری عوامل هواشناسی ۵۰ گانه در این سال‌ها در ایستگاه مشهد ارائه شده است. مطابق نتایج آن، از مجموع ۹ رخداد استخراج شده، سهم رخداد‌های ترسالی و خشکسالی به ترتیب ۴ و ۵ واقعه می‌باشد. رخداد‌های ترسالی به ترتیب در سال‌های ۷۶-۱۹۷۵، ۷۹-۱۹۷۸، ۸۳-۱۹۸۲ و ۹۲-۱۹۹۱ رخ داده‌اند که شدیدترین آن در سال ۸۳-۱۹۸۲ با مجموع امتیازات هواشناسی ۲۳ به وقوع پیوسته است. رخداد‌های خشکسالی نیز در سال‌های ۷۱-۱۹۷۰، ۸۹-۱۹۸۸، ۲۰۰۰-۱۹۹۹، ۰۱-۲۰۰۰ و ۰۶-۲۰۰۵ حادث شده‌اند که شدیدترین خشکسالی در سال ۰۱-۲۰۰۰ با مجموع امتیازات هواشناسی ۲۴- به وقوع پیوسته است. نتایج رخداد‌های خشکسالی و ترسالی‌های مهم استخراج شده بر اساس مدل چندمعرفه اسکالوگرام برای سایر ایستگاه-های مورد بررسی (تهران، تبریز، کرمانشاه و شیراز) در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین نتایج شدیدترین رخداد‌های ترسالی و خشکسالی

بیشتر هستند. ولی برای متغیرهای تشدید کننده خشکسالی، X درصد داده‌های ثبت شده کمتر از آن هستند.

چانگ (۱۴) و مرید و پایمزد (۱۲) سطوح شدت ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۹۵ درصد را برای تعیین سطوح طبقات مختلف خشکسالی به کار بردند. در این تحقیق سطوح آستانه‌ی ۹۰ و ۹۵ درصد برای طبقه‌های خشکسالی شدید و بسیار شدید و سطوح آستانه‌ی ۵ و ۱۰ درصد برای طبقه‌های ترسالی بسیار شدید و شدید انتخاب شده است. توضیح بیشتر آن که به‌عنوان مثال: در طبقه‌بندی شاخص بارش استاندارد شده (SPI) طبقه‌ی "خشکسالی شدید" فراوانی تجمعی ۳/۲ تا ۷/۶ درصد را شامل می‌شود که مقداری معادل فراوانی تجمعی ۳/۹۳ تا ۷/۹۷ درصد است. بسیاری دیگر از شاخص‌های خشکسالی مانند شاخص ZSI، EDI، CZI و RDI نیز از همین طبقه‌بندی استفاده کرده‌اند. بنابراین، آستانه‌ی ۹۰ درصد روش چانگ برای طبقه‌ی "خشکسالی شدید" در شاخص SPI در نظر گرفته شده و برای سایر طبقات نیز به همین روش عمل شده است.

### معیار آماری انتخاب شاخص مناسب خشکسالی

ابتدا برخی از تعاریف مربوط به پارامترهای مورد نیاز در رابطه‌ای که در این تحقیق به منظور انتخاب شاخص یا شاخص‌های مناسب در هر ایستگاه، پیشنهاد می‌شود، معرفی می‌شوند.

تعداد کل تصمیم‌ها ( $T_{Ind}$ ): تعداد رخداد‌های خشکسالی و ترسالی شدید و بسیار شدید در شاخص مورد بررسی، تعداد کل تصمیم‌های درست ( $T_{Sc}$ ): تعداد رخداد‌های خشکسالی و ترسالی شدید و بسیار شدید بر اساس مدل اسکالوگرام (به‌عنوان مدل مبنا) و تعداد تصمیم-های درست ( $T_C$ ): تعداد رخداد‌های خشکسالی و ترسالی مشترک در شاخص مورد بررسی با رخداد‌های مشابه در مدل اسکالوگرام. با محاسبه‌ی پارامترهای  $T_{Ind}$ ،  $T_{Sc}$  و  $T_C$  در هر یک از شاخص‌های مورد بررسی، مقدار صحت کلی ( $TA$ ) از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$TA = \frac{T_C}{T_{Ind}} \times \frac{T_C}{T_{Sc}} \quad (3)$$

در این رابطه، مقدار  $TA$  هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که شاخص مورد نظر از دقت بالاتری برای تشخیص رخداد‌های خشکسالی و ترسالی‌های هواشناسی برخوردار است و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت شاخص مورد بررسی کمتر می‌باشد.

### نتایج و بحث

#### نتایج توزیع‌های برآزش یافته بر ارزش عوامل هواشناسی

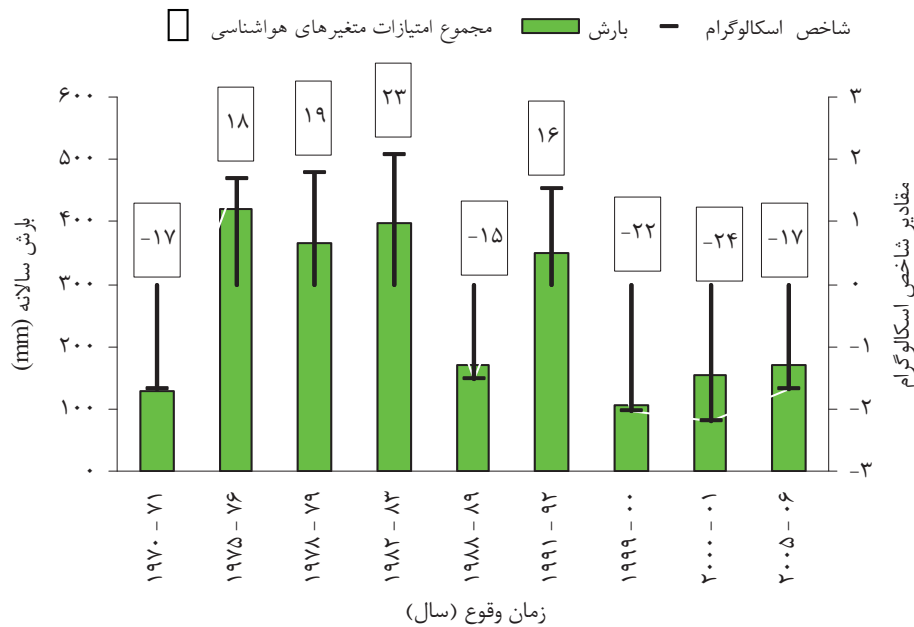
مطابق مراحل که در طراحی مدل اسکالوگرام بیان گردید با

تبریز از مجموع ۸ رخداد استخراج شده به ترتیب ۴ و ۴ واقعه‌ی ترسالی و خشکسالی به وقوع پیوسته است و در ایستگاه‌های کرمانشاه و شیراز نیز به ترتیب ۷ و ۱۰ رخداد به وقوع پیوست.

به همراه مجموع امتیازات اقلیمی آن‌ها نیز آورده شده است. بر اساس نتایج آن، در ایستگاه تهران از مجموع ۹ رخداد استخراج شده به ترتیب ۴ و ۵ واقعه‌ی ترسالی و خشکسالی به وقوع پیوسته است، در ایستگاه

جدول ۴- نتایج مناسب‌ترین توزیع‌های برازش یافته بر مقادیر مجموع ارزش عوامل هواشناسی در ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	توزیع منتخب	پارامترهای توزیع منتخب به ترتیب از چپ به راست			
مشهد	Logistic ( $\sigma, \mu$ )	-	-	۰/۴۲	۵/۷۷
تهران	Log. Logistic (3p) ( $\alpha, \beta, \gamma$ )	-	-۱۴۳/۰۸	۱۴۱/۷۹	۳۴/۳۸
تبریز	Weibull (3p) ( $\alpha, \beta, \gamma$ )	-	-۲۸/۳۲	۳۱/۶۵	۳/۵۴
کرمانشاه	Burr (4p) ( $k, \alpha, \beta, \gamma$ )	-۴۳/۸۰	۱۰۰/۰۵	۶/۴۴	۱۵۲/۶۸
شیراز	Log. Logistic (3p) ( $\alpha, \beta, \gamma$ )	-	-۹۹/۳۴	۹۷/۴۸	۱۸/۹۱



شکل ۲- مقادیر بارش و مجموع امتیازات هواشناسی رخدادهای خشکسالی و ترسالی تعیین شده بر اساس مدل اسکالوگرام در ایستگاه مشهد

جدول ۵- نتایج رخدادهای خشکسالی و ترسالی استخراج شده بر مبنای مدل اسکالوگرام در ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	تعداد رخدادها	سال وقوع رخداد خشکسالی	شدیدترین رخداد خشکسالی		سال وقوع رخداد ترسالی	شدیدترین رخداد ترسالی	
			جمع امتیاز	سال وقوع		جمع امتیاز	سال وقوع
مشهد	۹	۱۹۹۹-۰۰، ۱۹۸۸-۸۹، ۱۹۷۰-۷۱، ۲۰۰۵-۰۶ و ۲۰۰۰-۰۱	-۲۴	۲۰۰۰-۰۱	۱۹۸۲-۸۳، ۱۹۷۸-۷۹، ۱۹۷۵-۷۶ و ۱۹۹۱-۹۲	۲۳	۱۹۸۲-۸۳
تهران	۹	۱۹۶۹-۷۰، ۱۹۶۲-۶۳، ۱۹۵۹-۶۰، ۱۹۹۸-۹۹ و ۱۹۹۶-۹۷	-۱۳	۱۹۶۹-۷۰ و ۱۹۹۶-۹۷	۱۹۸۲-۸۳، ۱۹۷۱-۷۲، ۱۹۶۸-۶۹ و ۲۰۰۲-۰۳	۱۵	۱۹۶۸-۶۹ و ۱۹۷۱-۷۲
تبریز	۸	۱۹۸۸-۸۹، ۱۹۶۱-۶۲، ۱۹۵۹-۶۰ و ۱۹۹۸-۹۹	-۱۸	۱۹۹۸-۹۹	۱۹۸۰-۸۱ و ۱۹۶۸-۶۹، ۱۹۶۳-۶۴، ۱۹۶۲-۶۳ و ۱۹۶۸-۶۹	۱۸	۱۹۶۳-۶۴ و ۱۹۶۸-۶۹
کرمانشاه	۷	۱۹۹۸-۹۹، ۱۹۷۸-۷۹، ۱۹۶۳-۶۴ و ۱۹۹۹-۰۰	-۲۲	۱۹۹۹-۰۰	۱۹۹۱-۹۲ و ۱۹۷۱-۷۲، ۱۹۶۸-۶۹	۱۴	۱۹۶۸-۶۹
شیراز	۱۰	۱۹۹۲-۹۳، ۱۹۷۵-۷۶، ۱۹۷۱-۷۲ و ۱۹۹۵-۹۶ و ۱۹۹۴-۹۵	-۲۰	۱۹۶۵-۶۶	۱۹۷۰-۷۱، ۱۹۶۵-۶۶، ۱۹۶۲-۶۳ و ۱۹۹۹-۰۰ و ۱۹۹۸-۹۹	۲۰	۱۹۹۲-۹۳



## نتایج انتخاب شاخص مناسب

نتایج انتخاب شاخص مناسب بر اساس معیار TA برای ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۶ ارائه شده است. در ادامه چگونگی انجام این مقایسه و انتخاب شاخص مناسب بیان می‌گردد. ابتدا در هر شاخص رخدادهای خشکسالی و ترسالی با طبقه‌های شدید و بسیار شدید تعیین گردیدند. سپس نتایج آن با نتایج رخدادهای خشکسالی و ترسالی بدست آمده از مدل اسکالوگرام در هر ایستگاه (شکل ۲ و جدول ۵) مقایسه و پارامترهای تعداد تصمیمات درست ( $T_C$ )، تعداد تصمیمات نادرست ( $T_{Ind} - T_C$ ) و تعداد تصمیمات درست برآورد نشده ( $T_{Sc} - T_C$ ) در هر وضعیت خشکسالی و ترسالی تعیین گردید که در ستون‌های ۳، ۴ و ۵ جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است. در ادامه حاصل نسبت تعداد تصمیمات درست در مجموع دو وضعیت ترسالی و خشکسالی به تعداد کل تصمیم‌ها محاسبه ( $T_C/T_{Ind}$ ) و در ستون ششم جدول ۶ ارائه گردید. همچنین حاصل نسبت تعداد تصمیمات درست به کل تصمیمات درست ( $T_C/T_{Sc}$ ) در ستون هفتم جدول ۶ آورده شده است. سرانجام معیار TA جهت انتخاب شاخص مناسب بر اساس رابطه‌ی ۳، از ضرب ستون ششم در ستون هفتم بدست می‌آید که اعداد آن برای هر شاخص در ستون آخر جدول ۶ ارائه شده است.

به‌طور مثال بر اساس شاخص RAI در ایستگاه مشهد تعداد رخدادهای خشکسالی و ترسالی با طبقه‌های شدید و بسیار شدید برابر ۲۰ واقعه می‌باشند که سهم رخدادهای خشکسالی و ترسالی به ترتیب برابر ۱۲ و ۸ واقعه می‌باشد (اعداد ذکر شده از جمع ستون‌های ۳ و ۴ جدول ۶ برای شاخص RAI بدست آمد). از طرفی با توجه به نتایج مدل اسکالوگرام (شکل ۲) تعداد رخدادهای خشکسالی و ترسالی در این ایستگاه به ترتیب ۵ و ۴ واقعه می‌باشند. در شاخص RAI از ۱۲ رخداد خشکسالی با طبقه‌ی شدید و بالاتر ۵ مورد آن مقارن با سال وقوع رخدادهای خشکسالی در مدل اسکالوگرام می‌باشند و ۷ مورد دیگر در سال‌هایی به‌جز سال‌های وقوع رخدادهای خشکسالی مدل اسکالوگرام رخ داده‌اند بنابراین به‌عنوان تصمیمات نادرست تلقی شده‌اند. همچنین شاخص از ۸ مورد ترسالی با طبقه‌ی شدید و بالاتر، ۴ مورد مقارن با سال وقوع رخدادهای ترسالی مدل اسکالوگرام می‌باشند و ۴ مورد دیگر در سال‌هایی خارج از سال وقوع رخدادهای ترسالی این مدل حادث شده‌اند، بنابراین به‌عنوان تصمیمات نادرست برآورد نشده جدول ۶ آورده شده‌اند. در ستون ۶ تعداد تصمیمات درست برآورد نشده برای وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی در شاخص RAI به ترتیب صفر و صفر ثبت گردید که بدین مفهوم است که در هر یک از وضعیت‌های مذکور تعداد ۵ و ۴ رخداد خشکسالی و ترسالی استخراج شده برآورد گردیده‌اند و هیچ رخداد نتایج انتخاب شاخص و شاخص‌های مناسب در ایستگاه‌های تهران، تبریز، کرمانشاه و شیراز

در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج آن، شاخص  $RDI^*$  (Select) با مقدار TA برابر با ۰/۵۱ از دقت بالاتری جهت تشخیص رخدادهای خشکسالی و ترسالی در ایستگاه تهران برخوردار می‌باشد. شاخص  $RDI^*$  (Select) در مجموع ۷ سال را به‌عنوان سال‌هایی که در آن‌ها خشکسالی یا ترسالی با طبقه‌های شدید و بسیار شدید رخ داده است را نشان می‌دهد که از ۷ سال مذکور به ترتیب ۳ و ۳ سال آن مقارن با وقوع رخدادهای خشکسالی و ترسالی می‌باشد و تنها یک سال آن در وضعیت ترسالی مقارن با سال وقوع رخداد ترسالی (بر اساس مدل اسکالوگرام) نیست.

در ایستگاه تبریز سه شاخص  $SPI^*$ ،  $CZI$  و  $ZSI$  با مقدار TA برابر با ۰/۸۸ نسبت به ۵ شاخص دیگر از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. شاخص‌های مذکور در مجموع ۷ سال را به‌عنوان سال‌هایی که در آن‌ها خشکسالی یا ترسالی با طبقه‌های شدید و بسیار شدید رخ داده است را نشان می‌دهد که از ۷ سال مذکور به ترتیب ۳ و ۴ سال آن مقارن با وقوع رخدادهای خشکسالی و ترسالی می‌باشند. شاخص‌های مذکور از مجموع ۸ تصمیم درست (بر اساس مدل اسکالوگرام) تنها یک تصمیم درست را در وضعیت خشکسالی برآورد نکرده‌اند. در ایستگاه کرمانشاه شاخص  $CZI$  با مقدار TA برابر با ۰/۶۴ و در ایستگاه شیراز شاخص  $RDI^*$  (Select) با مقدار TA برابر با ۰/۵۱ نسبت به سایر شاخص‌ها از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. خشکسالی و ترسالی در خارج از سال‌های وقوع ترسالی و خشکسالی با طبقه‌های شدید و بسیار شدید روی نداده‌اند. در ستون ششم جدول ۶ برای شاخص RAI عدد ۰/۴۵ حاصل نسبت عدد ۹ (مجموع تصمیمات درست در دو وضعیت خشکسالی و ترسالی) به عدد ۲۰ (مجموع کل وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی) می‌باشد. در ستون هفتم از جدول مذکور در شاخص RAI عدد ۱/۰۰ حاصل نسبت عدد ۹ به ۹ رخداد خشکسالی و ترسالی استخراج شده برای ایستگاه مشهد می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه شاخص‌های مختلف در ایستگاه مشهد، شاخص  $RDI^*$  (Select) با مقدار TA برابر با ۰/۴۶ نسبت به هفت شاخص دیگر از دقت بالاتری جهت تشخیص رخدادهای خشکسالی و ترسالی استخراج شده برخوردار می‌باشد. شاخص  $RDI^*$  (Select) در مجموع ۶ سال را به‌عنوان سال‌هایی که در آن‌ها خشکسالی یا ترسالی با طبقه‌های شدید و بیشتر رخ داده است را نشان می‌دهد که از ۶ سال مذکور به ترتیب ۳ و ۲ سال آن مقارن با وقوع رخداد خشکسالی و ترسالی می‌باشد و تنها یک سال آن در وضعیت ترسالی مقارن با سال وقوع رخداد ترسالی نیست. این شاخص در مجموع ۴ تصمیم از تصمیمات درست را نتوانسته است برآورد نماید و با ضریب TA برابر با ۰/۴۶ به‌عنوان شاخص مناسب انتخاب می‌گردد.

جدول ۶- مقایسه‌ی شاخص‌های مختلف خشکسالی جهت انتخاب شاخص مناسب در ایستگاه مشهد

شاخص	وضعیت رطوبتی	تعداد تصمیمات درست	تعداد تصمیمات نادرست	تعداد تصمیمات درست برآورد نشده	m	n	TA
RAI	خشکسالی	۵	۷	۰	۰/۴۵	۱/۰۰	۰/۴۵
	ترسالی	۴	۴	۰			
SIAP	خشکسالی	۵	۶	۰	۰/۴۱	۱/۰۰	۰/۴۱
	ترسالی	۴	۷	۰			
DI	خشکسالی	۵	۵	۰	۰/۴۵	۱/۰۰	۰/۴۵
	ترسالی	۴	۶	۰			
PN	خشکسالی	۲	۰	۳	۰/۶۳	۰/۵۶	۰/۳۵
	ترسالی	۳	۳	۱			
*SPI	خشکسالی	۲	۱	۳	۰/۵۷	۰/۴۴	۰/۲۵
	ترسالی	۲	۲	۲			
CZI	خشکسالی	۲	۰	۳	۰/۶۷	۰/۴۴	۰/۳۰
	ترسالی	۲	۲	۲			
ZSI	خشکسالی	۲	۰	۳	۰/۶۷	۰/۴۴	۰/۳۰
	ترسالی	۲	۲	۲			
*RDI (Select)	خشکسالی	۳	۰	۲	۰/۸۳	۰/۵۶	۰/۴۶
	ترسالی	۲	۱	۲			

جدول ۷- نتایج انتخاب شاخص و یا شاخص‌های مناسب در ایستگاه‌های سینوپتیک تهران، تبریز، کرمانشاه و شیراز

ایستگاه	شاخص مناسب	وضعیت رطوبتی	تعداد تصمیمات درست	تعداد تصمیمات نادرست	تعداد تصمیمات درست برآورد نشده	TA
تهران	*RDI (Select)	خشکسالی	۳	۰	۲	۰/۵۱
		ترسالی	۳	۱	۱	
تبریز	*SPI، *CZI و ZSI	خشکسالی	۳	۰	۱	۰/۸۸
		ترسالی	۴	۰	۰	
کرمانشاه	CZI	خشکسالی	۴	۱	۰	۰/۶۴
		ترسالی	۲	۱	۱	
شیراز	*RDI (Select)	خشکسالی	۳	۰	۲	۰/۵۱
		ترسالی	۳	۱	۲	

## نتیجه‌گیری

انتخاب شاخص مناسب به‌منظور پایش خشکسالی، فرآیندی حساس، پیچیده و وابسته به شرایط متعدد می‌باشد. تبیین و استفاده از روش جدید انتخاب شاخص مناسب بر اساس سطوح آستانه‌ی چانگ و مدل چندمعرفه‌ی اسکالوگرام با در نظر گرفتن ۵۰ عامل هواشناسی مرتبط با مقدار بارش، تعداد روزهای بارانی و تبخیر و تعرق پتانسیل، وجه تمایز این تحقیق از تحقیقات مشابه است. زیرا در اکثر تحقیقات صورت گرفته از خشکسالی‌های سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ به‌عنوان ملاک ارزیابی و انتخاب شاخص مناسب استفاده شده است یا این که بر مبنای میزان همبستگی و مشابهت رفتاری شاخص مورد بررسی با

شاخص SPI، ارزیابی صورت گرفته‌است. هم‌چنین روش پیشنهاد شده در این تحقیق با ارائه‌ی یک معیار آماری با عنوان Total Accuracy (TA)، امکان مقایسه بین شاخص‌های مختلف را بر مبنای هدف تحقیق در مقیاس سالانه فراهم می‌نماید.

بر اساس نتایج معیار آماری TA، در سه ایستگاه مشهد، تهران و شیراز شاخص (Select) RDI به‌ترتیب با مقدار TA برابر با ۰/۴۶، ۰/۵۱ و ۰/۵۱، در ایستگاه تبریز سه شاخص \*SPI، \*CZI و ZSI با مقدار TA برابر با ۰/۸۸ و در ایستگاه کرمانشاه شاخص CZI با مقدار TA برابر با ۰/۶۴ به‌عنوان شاخص یا شاخص‌های مناسب برگزیده شدند.

شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، فرآیند انتخاب شاخص مناسب در مقیاس سالانه طراحی و شاخص‌های مختلف هواشناسی در این جهت ارزیابی گردیدند.

یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند انتخاب شاخص مناسب تعیین هدف پایش می‌باشد و در ادامه، تعیین شاخصی است که متناسب با هدف مورد بررسی نتایج قابل اطمینانی برای منطقه‌ی مورد بررسی به‌همراه داشته باشد. از این رو در این تحقیق، با هدف ارزیابی

## منابع

- ۱- اختری ر، مهدیان م.ح. و مرید س. ۱۳۸۵. تحلیل مکانی شاخص‌های SPI و EDI در استان تهران، مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۲ (۳)، ۲۷-۳۸.
- ۲- انصاری ح، داوری ک. و ثنائی نژاد س.ح. ۱۳۸۹. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SEPI)، توسعه یافته بر اساس منطق فازی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴ (۱)، ۳۸-۵۲.
- ۳- انصافی مقدم ت. ۱۳۸۶. ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک. فصلنامه‌ی علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران ۱۴ (۲)، ۲۷۱-۲۸۸.
- ۴- براتیان ع. ۱۳۸۲. تبیین مدل اسکالوگرام در تعیین تغییرات خشکسالی (مطالعه موردی شهرکرد). لوح فشرده مجموعه مقالات سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، دانشگاه اصفهان، ایران.
- ۵- خلیلی ع. و بذرافشان ج. ۱۳۸۲. ارزیابی کارایی چند نمایه‌ی خشکسالی هواشناسی در نمونه‌های اقلیمی مختلف ایران، نشریه نیوار، شماره ۴۸ و ۴۹، بهار و تابستان، ۹۳-۷۹.
- ۶- رضیعی ط، شکوهی ع.ر. و ثقیفیان ب. ۱۳۸۲. پیش‌بینی، تداوم و فراوانی خشکسالی با استفاده از روش‌های احتمالاتی و سری‌های زمانی (مطالعه‌ی موردی استان سیستان و بلوچستان)، مجله بیابان، ۸ (۲)، ۳۰۹-۲۹۲.
- ۷- سهرابی ر.ا، سهرابی ح. و عرب د.ر. ۱۳۸۷. بررسی شاخص‌های پایش خشکسالی از مناظر تحول، ماهیت و عملکرد و پیشنهاد فرآیند انتخاب شاخص متناسب با شرایط مناطق، لوح فشرده مجموعه مقالات سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران.
- ۸- قبائی سوق م. ۱۳۸۹. ارزیابی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۹۴ صفحه.
- ۹- کارآموز م. و عراقی نژاد ش. ۱۳۸۴. هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۴۶۰ صفحه.
- ۱۰- کریمی نظر م، مقدم‌نیا ع.ر. و مساعدی ا. ۱۳۸۹. بررسی عوامل اقلیمی مؤثر بر وقوع خشکسالی (مطالعه موردی: زابل). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۷ (۱)، ۱۴۵-۱۵۸.
- ۱۱- مرعشی م. ۱۳۸۷. بررسی شاخص‌های خشکسالی در مناطق نیمه‌مرطوب و خشک (مطالعه موردی: گلستان - سیستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل، ۱۴۶ ص.
- ۱۲- مرید س. و پایمزد ش. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی جهت پایش روزانه خشکسالی: مطالعه موردی دوره خشکسالی ۱۳۷۸ لغایت ۱۳۸۰ استان تهران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۱ (۴۲)، ۳۳۳-۳۲۵.
- ۱۳- مساعدی ا. و قبائی سوق م. ۱۳۹۰. تصحیح شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بر اساس انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع احتمال. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۵)، ۱۲۱۶-۱۲۰۶.
- 14- Chang T.J., and Kleopa X. 1991. A purposed method for drought monitoring. Water Resource Research, 2: 275-281.
- 15- Edwards D.C., and McKee T.B. 1997. Characteristics of 20<sup>th</sup> century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report, 97, 2: Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- 16- Hayes M.J. 2000. What is drought?. National drought mitigation center, URL: [www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm](http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm).
- 17- Mishra A.K., and Singh V.P. 2010. A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391: 202-216.
- 18- Morid S., Smakhtin V.U., and Moghaddasi M. 2006. Comparison of Seven Meteorological Indices for Drought Monitoring in Iran. International Journal of Climatology, 26: 971-985.
- 19- Quiring S.M., and Papakryiakou T.N. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 118, 1-2: 49-62.
- 20- Smakhtin V.U., and Hughes D.A. 2007. Automated estimation and analyses of meteorological drought

- characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling & Software*, 22: 880-890.
- 21- Tsakiris G., Pangalou D., and Vangelis H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resource Manage*, 21: 821-833.
- 22- Wu H., and Hayes M.J. 2001. An evaluation of the standardized precipitation index, the china index and statistical Z- Score. *International journal of climatology*, 21: 741-758.

## Design Process of Selecting Appropriate Drought Index Based on Monitoring Multivariate Meteors in Some Stations of Arid and Semi-Arid Regions, Iran

M. Ghabaei Sough<sup>1</sup> - A. Mosaedi<sup>2\*</sup>

Received:7-8-2011

Accepted:4-12-2011

### Abstract

In drought monitoring, different indices usage may leads to different results. In this study, Meteorological variable statistics from 5 synoptic stations of Mashhad, Tehran, Tabriz, Kermanshah and Shiraz among 50 years periods, 1957-58 to 2006-07 were used. In order to evaluate meteorological drought indices, 8 indices such as: RAI, SIAP, DI, PN, \*SPI, CZI, SZI and \*RDI (Select) were examined. In this study, in order to Promote them, by utilizing 50 metrological variable related to precipitation, evapotranspiration and number of rainy days, a new multivariate method for detect dry and wet years was established based on Chang threshold and Scalogram model. Then based on mentioned years as criteria of important dry and wet years and applying a new statistical criteria as "Total Accuracy (TA)", appropriate index was selected. In 3 synoptic stations of Mashhad, Tehran and Shiraz, TA value for \*RDI (Select), was equal to 0.46, 0.51 and 0.51 respectively. In Tabriz station TA value of 3 indices, \*SPI, CZI, SZI was equal to 0.88 and in Kermanshah station TA value of CZI index was equal to 0.64. These indices used as proper index for each station.

**Keywords:** Drought Indices, Appropriate index, Scalogram, Threshold levels, Iran

1- Former MSc Student, Department of Water Resources Engineering, Gorgon University of Agricultural Sciences and Natural Resources

2- Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

(\* - Corresponding Author Email: [mosaedi@um.ac.ir](mailto:mosaedi@um.ac.ir))