

ارزیابی و مقایسه چند نمایه خشک‌سالی اقلیمی و تعیین بهترین نمایه در ایران مرکزی

عباس علیپور^{۱*}، مصطفی هاشمی^۲، سید اسعد حسینی^۳، فرشاد پژوه^۴۱. استادیار جغرافیای سیاسی دانشگاه امام حسین^(ع)، تهران

۲. دانشجوی دکتری جغرافیای سیاسی دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران

۳. دکتری اقلیم‌شناسی دانشگاه محقق اردبیلی

۴. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی دانشگاه خوارزمی تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۰/۲۹)

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی کارایی هشت نمایه خشک‌سالی در استان‌های اصفهان، کرمان و یزد و انتخاب بهترین نمایه است. بدین منظور، با استفاده از داده‌های ماهانه و سالانه بارش طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و با استفاده از هشت نمایه خشک‌سالی در ۲۰ ایستگاه هواشناسی مرکز ایران دقت هر یک از نمایه‌ها در تعیین خشک‌سالی بررسی شده است. پهنه‌بندی نیز در نرم‌افزار ARC GIS ۹/۳ برای خشک‌ترین سال طی دوره آماری و براساس بهترین نمایه انتخابی صورت گرفته است. برای انتخاب بهترین نمایه‌ها در مقیاس ماهانه و سالانه از سنج کارآمد تقارن سال وقوع کمینه بارندگی با خشک‌سالی بسیار شدید در ایستگاه‌های منطقه استفاده شده است. نتایج نشان داد در مقیاس ماهانه فقط نمایه SPI ۶ و ۱۲ ماهه برای پیش خشک‌سالی حتی در ماه‌های کم‌باران که با داده‌های صفر مواجه می‌شوند را داراست. در این مقیاس زمانی نمایه‌های استاتیک مثل RAI و DI قادر به تعیین شرایط واقعی خشک‌سالی نیستند؛ اما در مقیاس سالانه نمایه‌های RAI و DI در همه ایستگاه‌ها سال کمینه بارندگی را مطابق با خشک‌سالی بسیار شدید نشان داده بودند و به‌عنوان بهترین نمایه شناخته شدند. ضعیف‌ترین نمایه نیز متعلق به نیچه بود که توانایی تعیین شدت خشک‌سالی را در کل منطقه مطالعه‌شده نداشت. در مقایسه کارایی نمایه RAI و SPI نیز مشخص شد که نمایه RAI رخداد خشک‌سالی بسیار شدید را در همه منطقه نشان داده است، اما نمایه SPI در چند ایستگاه قادر به نمایش رده خشک‌سالی بسیار شدید طی دوره ۳۰ ساله در منطقه ایران مرکزی نبوده است.

کلیدواژگان: ایران مرکزی، بارندگی، پهنه‌بندی، خشک‌سالی، نمایه RAI.

مقدمه

خشک‌سالی یکی از بلایای طبیعی است که خسارت‌های زیادی به زندگی انسان و اکوسیستم‌های طبیعی وارد می‌کند و با دیگر حوادث طبیعی از قبیل سیل، توفان و زلزله تفاوت‌هایی دارد. عمده این تفاوت‌ها در تأثیر تدریجی خشک‌سالی طی یک دوره نسبتاً طولانی، ممکن نبودن تعیین دقیق زمان شروع و خاتمه و وسعت جغرافیایی تأثیر آن است. در کل، خشک‌سالی عبارت است از کاهش غیرمنتظره بارش در مدتی معین در منطقه‌ای که لزوماً خشک نیست [۱]. بروغنی و همکارانش به تحلیل ارتباط خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی دشت سبزووار با استفاده از شاخص‌های SWI و SPI پرداختند [۲]. نتایج پژوهش آنها نشان داد خشک‌سالی اقلیمی و هیدرولوژیکی از نظم خاصی تبعیت نمی‌کند و بیشترین شدت و فراوانی خشک‌سالی در غرب دشت سبزووار بوده است. شرق دشت شرایط نرمال و ترسالی دارد و خشک‌سالی هیدروژئولوژیکی با یک سال تأخیر نسبت به خشک‌سالی اقلیمی اتفاق می‌افتد. انصافی مقدم در مطالعه‌ای چند شاخص خشک‌سالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک را ارزیابی کرد [۳]. نتایج پژوهش او نشان داد شاخص SPI و دهک‌ها در جایگاه نخست، شاخص ZSI در جایگاه دوم و شاخص درصد نرمال در جایگاه سوم قرار می‌گیرد. ایران یکی از کشورهایی است که در کمربند بیابانی کره زمین قرار دارد و در برخی سال‌ها از خشک‌سالی و در بعضی سال‌های دیگر از ترسالی آسیب می‌پذیرد. با استفاده از شاخص‌ها و ابزارهای تحلیل متعددی که وجود دارد، تلاش می‌شود سیستم‌های پایش خشک‌سالی با استفاده از این شاخص‌ها طراحی شوند و اطلاعاتی که از آنها استخراج می‌شود بیانگر عملیات مقابله با خشک‌سالی و زمان شروع آنهاست. شاخص‌هایی که بیشتر در این خصوص به کار برده می‌شوند، عبارت‌اند از: شاخص درصد از نرمال (PN)، شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI)، شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص Z (CZI) و شاخص دهک (DI).

تا کنون مطالعات متعددی درباره خشک‌سالی‌ها صورت گرفته است. تحقیقات گائو و همکارانش در ارزیابی شاخص‌های مختلف خشک‌سالی در نمایش خشک‌سالی‌های تابستانه در جنگل‌های شمالی فنلاند

مشخص کرد که سال ۲۰۰۶ جنگل‌های مناطق شمالی فنلاند بیشترین خسارت ناشی از خشک‌سالی را تجربه کرده‌اند [۶]. همچنین شاخص SMI در تعیین خشک‌سالی منطقه مطالعه شده عملکرد بهتری داشته است. با توجه به مطالعات حامدی و همکارانش در بررسی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی در حوضه رودخانه چی در تایلند نشان دادند شاخص‌های چندمتغیره SPEI و SPAEI دقت بیشتری در تشخیص تغییرپذیری شدت خشک‌سالی نسبت به شاخص SPI دارند [۷]. حسینی و همکارانش به پایش خشک‌سالی و روند آن در شهرستان سنندج پرداختند [۸]. نتایج پژوهش آنها نشان داد خشک‌سالی‌های با شدت بسیار زیاد در منطقه رخ نداده و خشک‌سالی شدید فقط یک بار در طول دوره آماری بررسی شده (۱۹۶۰-۲۰۰۵) رخ داده است.

تجزیه و تحلیل ویژگی‌های سیر تکاملی خشک‌سالی براساس شاخص SIAP در حوضه رود هاپه^۱ با استفاده از داده‌های ۳۵ ساله بارش توسط جان و همکارانش [۹] بررسی شد. نتایج نشان داد فراوانی خشک‌سالی در اوایل قرن ۲۱ در این حوضه کاهش و شدت خشک‌سالی افزایش یافته است. جهانگیر و همکارانش در بررسی وضعیت خشک‌سالی استان تهران و البرز با استفاده از نمایه SPI و شبکه‌های عصبی نشان دادند تعداد دوره‌های خشک‌سالی بسیار شدید شش بار (مختص به ایستگاه پلور، SPI3) و تعداد دوره‌های خشک‌سالی شدید متغیر و حدود ۳۰ بار برای SPI3 و تا چهار مورد نیز برای SPI24 بوده است [۱۰]. ایستگاه‌های آرموت و فیروزکوه نیز طولانی‌ترین دوره‌های خشک‌سالی را پشت سر گذاشته‌اند. خلیلی و بذرافشان نمایه‌های خشک‌سالی هواشناسی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نمایه‌های دهک‌های بارندگی (DPI) و نمایه معیار بارندگی سالانه (SIAP) بهترین کاربرد را برای ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در ایران دارند [۱۱]. کریمی و همکارانش در بررسی خشک‌سالی هواشناسی در دشت ساری-نکا با استفاده از چهار شاخص ZSI، RAI، CZI و PNPI نشان دادند شاخص CZI با ZSI و شاخص RAI با PN تشابه بیشتری داشته است، همچنین در بیشتر ایستگاه‌ها بعد از سال ۱۳۷۷

شاخص SPEI اصلاحی بررسی کردند [۲۳]. نتایج پژوهش آنها نشان داد بین مقادیر شاخص SPEI در شرایط خشک‌سالی و ترسالی برای هر دو شهر همخوانی وجود دارد و طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ طولانی‌ترین دوره‌های خشک‌سالی را تجربه کرده‌اند. با توجه به پیشینه اشاره‌شده تا کنون کاری گسترده و در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های مختلف و در قالب تحلیل زمانی و مکانی و بررسی بهترین شاخص خشک‌سالی که هدف این تحقیق را تشکیل می‌دهد، صورت نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر سعی در ارائه یک الگوی واکاوی شدت و مدت خشک‌سالی و تحلیل زمانی و مکانی آن برای شناسایی مناطق حساس و آسیب‌پذیر مناطق مطالعه‌شده در مقابل خشک‌سالی دارد.

منطقه مطالعه شده

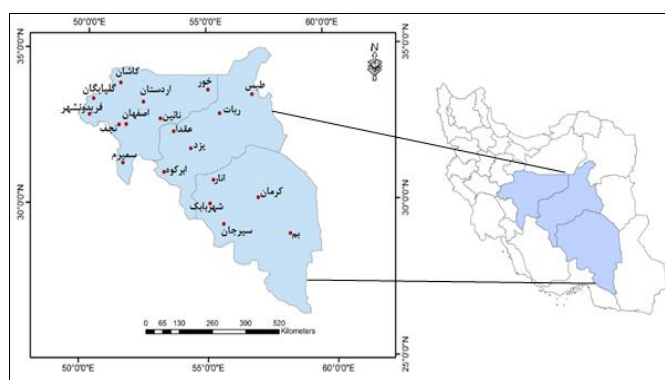
منطقه ایران مرکزی در محدوده ۲۵ تا ۳۴ درجه عرض شمالی و ۴۹ تا ۵۹/۵ درجه طول شرقی واقع شده است. این ناحیه بخش وسیعی از سرزمین ایران شامل مناطق کویری و بیابانی در مرکز کشور را در بر می‌گیرد که استان‌های کرمان، یزد و اصفهان را شامل می‌شود. این منطقه از شمال به استان سمنان، از جنوب به استان هرمزگان، از شرق به استان خراسان جنوبی و زاهدان و از غرب نیز به کهگیلویه و فارس ختم می‌شود. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

داده‌ها و روش‌ها

برای انجام این تحقیق ابتدا آمار بارش روزانه ۳۰ سال اخیر (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و در ۲۰ ایستگاه واقع در استان‌های کرمان، یزد و اصفهان از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. سپس در بررسی درستی و همگنی داده‌های آماری، دو روش آزمون منحنی جرم مضاعف و آزمون توالی استفاده شده و در کلیه ایستگاه‌های منطقه اعمال شده است. برای بازسازی نواقص آماری با استفاده از آمار ایستگاه‌های موجود در اطراف ایستگاه ناقص، همبستگی بین ایستگاه‌ها و روش نسبت نرمال (انتخاب ایستگاه‌هایی که شرایط جغرافیایی و اقلیمی یکسان با ایستگاه ناقص دارند) یک ماتریس تشکیل و سپس معناداری نتایج در سطح ۱ درصد و ۵ درصد آزمایش شدند [۴].

خشک‌سالی هواشناسی بسیار شدید افزایش یافته است [۱۲]. مک کی و همکارانش به مطالعه آن با استفاده از ضرایب همبستگی بین دو نمایه بارش استاندارد و پالمر در مقیاس‌های زمانی متعدد پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این دو شاخص بیشترین همبستگی را در مقیاس زمانی نزدیک به ۱۲ ماه دارند که در این مقیاس ضریب همبستگی نزدیک به ۰/۹۰ و کمترین همبستگی مختص به مقیاس زمانی ۲۴ ماه است [۱۵]. ناصرزاده و احمدی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی و پهنه‌بندی آن در استان قزوین را بررسی کردند [۱۶]. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد شاخص Z و شاخص بارندگی استاندارد شده در نشان دادن خشک‌سالی شدید، عملکرد بهتری دارند. همچنین شاخص دهک‌ها با توجه به عملکرد مناسب در مشخص کردن خشک‌سالی شدید، اندکی مبالغه در نمایش خشک‌سالی شدید دارد. نیکبخت و همکارانش شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی با درصد شاخص نرمال در شمال غرب ایران را تجزیه و تحلیل کردند و نتایج تحقیق آنها نشان داد شدیدترین خشک‌سالی هیدرولوژیکی در همه ایستگاه‌ها طی سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۰ و ۲۰۰۱-۲۰۰۲ رخ داده است و شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی براساس شاخص PNI در طول ۳۴ سال گذشته افزایش یافته است [۱۷]. ناؤومان و همکارانش در مطالعه‌ای با عنوان «مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی با استفاده از مجموعه داده‌های مختلف شبکه‌ای بارش در قاره آفریقا» نشان دادند بیشتر شاخص‌های واکاوی شده در نمایش زمان خشک‌سالی با هم منطبق بوده‌اند، اما در تعیین گستره خشک‌سالی‌ها به صورت مختلف عمل کرده‌اند [۱۸]. همچنین اختلاف اصلی بین شاخص‌های خشک‌سالی را نتیجه عدم قطعیت در مجموعه داده‌های بارش می‌دانند.

رضیئی ویژگی‌های خشک‌سالی در منطقه خشک و نیمه‌خشک شرق و مرکز ایران را با استفاده از شاخص SPI انجام داد [۲۰]. نتایج پژوهش او نشان داد فراوانی خشک‌سالی با شدت‌های مختلف در بخش شمالی منطقه بیشتر از دیگر نقاط است در حالی که نواحی جنوبی منطقه بیشتر در معرض وقوع خشک‌سالی‌های شدید تا بسیار شدید قرار دارد. سبقتی و همکارانش دو ویژگی تداوم و شدت خشک‌سالی شهرهای ارومیه و تبریز را به‌وسیله



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منطقه مطالعه شده

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{S} \quad (2)$$

P_i : مقدار بارش در دوره مد نظر

\bar{P} : میانگین بارندگی در طول دوره آماری

S : انحراف معیار سری بارندگی

شاخص نمره استاندارد (ZSI)

اساس کار در این شاخص بدین صورت است که داده‌های میانگین سالانه، فصلی و ماهانه بارش ابتدا به صورت فصلی و سالیانه درمی‌آید و سپس میانگین و انحراف معیار آنها مشخص می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S * D} \quad (3)$$

X_i : بارش یا زمان مد نظر

\bar{X} : میانگین مجموع بارش

$S * D$: انحراف معیار بارش در طول دوره مد نظر.

میانگین و انحراف معیار این عامل، به ترتیب برابر صفر و یک است و بنابراین از نظر مقایسه بین ایستگاه‌ها می‌تواند کاربرد زیادی داشته باشد. جدول ۱ طبقه‌بندی مختلف شاخص نمره استاندارد (z-Score) نشان می‌دهد.

شاخص دهک‌ها (DI)

مرتب کردن داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه بر حسب دهک‌ها و براساس توزیع نرمال، یکی دیگر از روش‌های پایش خشک‌سالی است که شاخص گیبس و موهر^۱ نیز اطلاق می‌شود. محاسبه آن به این صورت است که وقوع بارندگی‌های طولانی‌مدت را در دهم‌هایی از توزیع نرمال تقسیم می‌کنند و

نمایه‌های خشک‌سالی هواشناسی

به منظور واکاوی خشک‌سالی از تعدادی نمایه‌ها برای مشخص کردن وضعیت این پدیده در منطقه مطالعه شده استفاده می‌شود. این نمایه‌ها ترکیبی از پارامترهای مختلف هستند که بر ویژگی‌های خشک‌سالی شامل فراوانی، شدت، گستره و دوره تداوم تأثیر می‌گذارند. نمایه‌هایی که برای پایش خشک‌سالی منطقه ایران مرکزی در این پژوهش استفاده شده در ادامه تشریح خواهد شد.

شاخص معیار بارش سالانه (SIAP)

در این شاخص ابتدا مجموع بارش‌ها در یک سال را از میانگین مجموع بارش در یک دوره آماری کم کرده و جواب به دست آمده را در مرحله بعد بر انحراف معیار داده‌های دوره آماری مد نظر تقسیم می‌کنیم که معادله آن به شرح زیر است [۱۱]؛ و طبق جدول ۱ طبقه‌بندی می‌شود.

$$SIAP = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (1)$$

P_i : بارندگی سال هیدرولوژی

\bar{P} : میانگین بارندگی در طول دوره آماری

SD : انحراف معیار سری بارندگی

شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI)

طبق این روش، دوره خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به طور مستمر منفی و به مقدار -۱ یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت شود و مقادیر تجمعی SPI نیز، بزرگی و شدت دوره خشک‌سالی و همچنین دوره‌های مرطوب را نشان می‌دهد. معادله آن به صورت زیر و طبقه‌بندی مقادیر SPI در جدول ۱ ارائه شده است [۱۵].

۱. محاسبه میانگین درازمدت بارندگی در ایستگاه‌های مد نظر؛

۲. استخراج میانگین ده مورد از بیشترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده در دوره‌های مطالعاتی؛

۳. استخراج میانگین ده مورد از کمترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده در دوره‌های مطالعاتی؛

۴. مقایسه داده‌های بارندگی یا میانگین درازمدت بارندگی؛

چنانچه $P > \bar{P}$ یا ناهنجاری مثبت باشد، شاخص ناهنجاری بارندگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RAI: 3 \frac{P - \bar{P}}{M - \bar{P}} \quad (6)$$

اگر $P < \bar{P}$ یا ناهنجاری منفی باشد، شاخص ناهنجاری بارندگی به صورت زیر خواهد بود:

$$RAI: -3 \frac{P - \bar{P}}{X - \bar{P}} \quad (7)$$

۵. نسبت داده آستانه‌های +۳ و -۳ به ترتیب به میانگین ده مورد از شدیدترین ناهنجاری‌های مثبت و منفی به دست آمده از شاخص ناهنجاری بارندگی؛

۶. با مقیاس گذاری روی مقادیر به دست آمده از شاخص ناهنجاری بارندگی، نه طبقه ناهنجاری با دامنه‌ای از شرایط رطوبت بسیار شدید تا خشک‌سالی بسیار شدید تعیین می‌شود. طبقه‌بندی خشک‌سالی براساس شاخص RAI در جدول ۱ آمده است.

شاخص نیچه^۱ (NICHE)

نیچه از سه معادله آماری برای کمی کردن بارش و تعیین و طبقه‌بندی خشک‌سالی و ترسالی و سال‌های توأم با بارش عادی استفاده کرده است. معادلات یادشده عبارت‌اند از:

$$\bar{P} - SD \leq P_i \leq \bar{P} + SD \quad (8)$$

$$P_i \geq \bar{P} + SD \quad \text{سال مرطوب} \quad (9)$$

$$P_i \geq \bar{P} - SD \quad \text{سال خشک} \quad (10)$$

که در آن P_i بارندگی سال i و SD انحراف معیار بارش در طول دوره آماری، \bar{P} میانگین بارندگی بلندمدت است. این روش با توجه به معادلات یادشده یک محدوده برای بارش نرمال (معادله ۱) و دو عدد آستانه یکی برای شروع ترسالی

هر یک از گروه‌ها را یک دهک می‌نامند. اولین دهک یعنی مقدار بارندگی که از ده درصد و دومین دهک از بیست درصد وقوع بارندگی تجاوز نمی‌کند؛ و این دهک‌ها تا دهک دهم ادامه می‌یابد روش دهک برای سیستم پایش خشک‌سالی استرالیا انتخاب و استفاده شده است، زیرا محاسبه نسبتاً ساده‌ای دارد و نسبت به شاخص پالم، داده‌ها و فرضیات کمتری لازم دارد. اصول کلی در محاسبه دهک‌ها به صورت زیر است:

۱. مرتب کردن داده‌های بارندگی به صورت صعودی؛

۲. تعیین دامنه دهکی با استفاده از رابطه زیر [۵]:

$$D_i: i \frac{n+1}{10} \quad (4)$$

D_i : دهک i ام

i : شماره دهک

N : تعداد داده‌های بارندگی

۳. برآورد مقادیر بارندگی مختص به هر دهک؛

۴. تعیین سال‌های آماری که در دهک‌های مختلف قرار گرفته‌اند.

شاخص درصدی از نرمال (PNPI)

شاخص درصد نرمال بارش توسط ویلکی در سال ۱۹۴۴ ارائه شد. استفاده از این شاخص، از ساده‌ترین روش‌های ارزیابی شدت خشک‌سالی است. این شاخص از تقسیم مقدار واقعی بارش بر بارش نرمال و ضرب آن در عدد ۱۰۰ به دست می‌آید. به بیان دیگر این شاخص برای یک ماه خاص با توجه به رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۴].

$$PN = \frac{P_i}{\bar{P}} \times 100 \quad (5)$$

که در آن P_i مجموع بارندگی ماهانه

\bar{P} میانگین ماهانه بارندگی بلندمدت بر حسب میلی‌متر

این شاخص می‌تواند برای بازه‌های زمانی مختلف

محاسبه شود. طبقه‌بندی خشک‌سالی را براساس شاخص درصد بارش در جدول ۱ نشان می‌دهد.

شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI)

شاخص ناهنجاری بارندگی را روی در سال ۱۹۶۵ ارائه کرد. اساس شاخص ناهنجاری بارندگی، محاسبه انحراف میزان بارندگی از مقدار نرمال است [۲۱].

مراحل محاسبه شاخص به صورت زیر است:

$$C_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{Z \times \sigma_i^2} \quad (12)$$

که در آن C_{si} ، ضریب چولگی و n تعداد کل ماه‌های دوره آماری است؛ و نیز:

$$\Phi_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{\delta_i} \quad (13)$$

در این رابطه Φ_{ij} ، متغیر استاندارد شده، X_{ij} ، بارندگی ماه j برای دوره i و δ_i و \bar{X}_{ij} به ترتیب میانگین و انحراف معیار بارندگی در هر مقیاس زمانی است. برای طبقه‌بندی این شاخص از همان مقیاس SPI استفاده می‌شود. برای محاسبه میانگین، از میانه نیز استفاده شده است که به آن CZI اصلاح‌شده می‌گویند. جدول ۱ طبقات مختلف نمایه‌های خشک‌سالی را نشان می‌دهد.

(معادله ۲) و دیگری برای شروع خشک‌سالی (معادله ۳) دارد. مقادیر آستانه محاسبه‌شده در روش نیچه برای هر ایستگاه محاسبه شد. از بین نمایه‌های بررسی‌شده کمترین طبقات را برای نمایش خشک‌سالی داشت.

شاخص Z چینی (CZI)

شاخص CZI براساس تبدیل ریشه سوم ویلسون هیلفرتی است، با این فرض که داده‌ها از توزیع پیرسون نوع III تبعیت می‌کنند. CZI مطابق رابطه زیر برآورد می‌شود میرزایی و سبوع [۱۴].

$$Z_{ij} = \frac{\phi}{c} \left(\frac{c_{si}}{2} \phi + 1 \right)^{1/3} - \frac{\phi}{Z_{si}} + \frac{c_{si}}{\phi} \quad (11)$$

که در آن Z_{ij} شاخص Z چینی و i مقیاس زمانی مد نظر که می‌تواند ۱، ۲، تا ۷۲ ماه و j ، ماه جاری است. همچنین:

جدول ۱. طبقات خشک‌سالی و ترسالی نمایه‌های انتخابی در تحقیق

| رده | RAI | ZSI | SIAP | SPI | PNPI | DI | CZI |
|-----|--------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| ۱ | بیشتر از ۳ | $2 \geq$ | $1,28 >$ | ۲ و بیشتر | $160 \geq$ | $90 \geq$ | $2 \geq$ |
| ۲ | ۲/۱ تا ۳ | ۱/۵ تا ۱/۹۹ | ۰/۸۴ تا ۱/۲۸ | ۱/۵ تا ۱/۹۹ | ۱۴۵ تا ۱۶۰ درصد | ۸۰ تا ۹۰ درصد | ۱/۵ تا ۱/۹۹ |
| ۳ | ۱/۲ تا ۲/۱ | ۰/۹۹ تا ۱/۴۹ | ۰/۵۲ تا ۰/۸۴ | ۱ تا ۱/۴۹ | ۱۳۰ تا ۱۴۵ درصد | ۷۰ تا ۸۰ درصد | ۰/۹۹ تا ۱/۴۹ |
| ۴ | ۱/۲ تا -۱/۲ | ۰/۹۹ تا -۰/۹۹ | ۰/۵۲ تا -۰/۵۲ | -۰/۹۹ تا ۰/۹۹ | ۷۰ تا ۱۳۰ درصد | ۳۰ تا ۷۰ درصد | -۰/۹۹ تا ۰/۹۹ |
| ۵ | -۱/۲ تا -۲/۱ | -۱ تا -۱/۴۹ | -۰/۵۲ تا -۰/۸۴ | -۱ تا -۱/۴۹ | ۵۵ تا ۷۰ درصد | ۲۰ تا ۳۰ درصد | -۱ تا -۱/۴۹ |
| ۶ | -۲/۱ تا ۳ | -۱/۵ تا -۱/۹۹ | -۰/۸۴ تا -۱/۲۸ | -۱/۵ تا -۱/۹۹ | ۴۰ تا ۵۵ درصد | ۱۰ تا ۲۰ درصد | -۱/۵ تا -۱/۹۹ |
| ۷ | $-3 <$ | $-3 \leq$ | $-1,28 <$ | ۲- و کمتر | $40 <$ | $10 <$ | $-2 \leq$ |

توضیح: ۱: ترسالی بسیار شدید، ۲: ترسالی شدید، ۳: ترسالی متوسط، ۴: نرمال، ۵: خشک‌سالی متوسط، ۶: خشک‌سالی شدید، ۷: خشک‌سالی بسیار شدید

نتایج و بحث

شاخص ZSI

پایش خشک‌سالی را ندارد؛ اما در ماه‌های پرباران (فصل زمستان) توانسته است همه رده‌های خشک‌سالی و ترسالی را نشان دهد که نشان از کارایی نمایه در فصول مرطوب سال است. این نمایه همانند نمایه‌های CZI و DI در بیشتر سال‌های بررسی‌شده طی فصول گرم و کم‌بارش وضعیت خشک‌سالی را به صورت نرمال نشان داده است.

برای بررسی کارایی نمایه‌ها در دو مقیاس زمانی ماهانه و سالانه بررسی شدند. در نمایه ZSI همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، امکان استفاده از این نمایه برای بررسی خشک‌سالی در مقیاس سالانه وجود دارد؛ اما در ماه‌های خشک به دلیل تشابه اعداد و برخورد با عدد صفر توانایی

جدول ۲. مقادیر ماهانه و سالانه نمایه Z در ایستگاه کرمان طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴

| سال‌ها | ژانویه | فوریه | مارس | آوریل | می | ژوئن | جولای | اوت | سپتامبر | اکتبر | نوامبر | دسامبر | سالانه |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| ۱۹۸۵ | ۰/۹۳ | -۰/۱۸ | -۰/۷ | -۱/۲ | ۰/۸ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | -۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | ۰/۸۲ | ۰/۳۷ | -۰/۵۳ |
| ۱۹۸۶ | -۱/۳۷ | -۰/۲۳ | ۱/۷۸ | -۰/۱۵ | -۰/۴۴ | ۰/۳۳ | -۰/۳۶ | ۱/۴۸ | -۰/۳۸ | -۰/۳۷ | ۱/۶۸ | ۲/۹۵ | ۱/۷۳ |
| ۱۹۸۷ | -۱/۳۱ | -۰/۹۱ | -۰/۱۷ | -۰/۹۷ | -۰/۲۹ | ۰/۲۶ | ۴/۲۷ | -۰/۳۷ | -۰/۳۸ | ۰/۱۷ | -۰/۵۴ | -۰/۷۳ | -۱/۷۷ |
| ۱۹۸۸ | ۱/۴۲ | ۰ | ۰/۶۳ | ۲/۲۱ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | -۰/۲۲ | ۰/۳۷ | ۰/۶۴ | -۰/۴ | -۰/۷ | -۰/۵۷ | ۰/۲۳ |
| ۱۹۸۹ | -۱/۳ | -۰/۸۴ | ۱/۴۸ | ۰/۱۴ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | -۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | ۰/۵۷ | -۰/۲۴ | -۰/۵۶ |
| ۱۹۹۰ | ۰/۳ | -۰/۴۸ | -۰/۴ | -۰/۳۲ | -۰/۴۹ | ۰/۳۳ | ۲/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | -۰/۰۵ | -۰/۵۹ | -۰/۹۲ |
| ۱۹۹۱ | ۲ | -۰/۶۵ | ۲/۱۶ | -۰/۵۸ | -۰/۴۴ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۲۵ | -۰/۸۲ | -۰/۱۶ | ۰/۶۸ |
| ۱۹۹۲ | ۰/۶۹ | -۰/۸۱ | ۰/۸ | ۱/۴۶ | -۲/۶۸ | -۰/۲۷ | ۰/۳۶ | ۰/۳۱ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | -۰/۸۶ | ۱/۸۵ | ۲/۳۲ |
| ۱۹۹۳ | ۰/۸۵ | ۱/۷ | -۰/۵۸ | -۰/۸ | -۰/۳۶ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۰۲ | -۰/۸۶ | -۰/۷ | ۰/۱۸ |
| ۱۹۹۴ | -۱/۳۱ | -۰/۷۵ | ۰/۸۶ | -۰/۸ | ۱/۲۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | ۴/۱۴ | -۰/۶۳ | ۰/۰۸ | -۰/۰۳ |
| ۱۹۹۵ | ۰/۲۵ | ۰/۴۵ | ۰/۳۶ | ۰/۸۵ | ۲/۸۴ | ۴/۲۷ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | ۱/۱۲ | -۰/۸۶ | ۱/۰۱ | ۲/۱۷ |
| ۱۹۹۶ | ۰/۳۹ | ۰/۵ | ۱/۰۲ | ۰/۷۲ | ۰/۶۱ | -۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۰۱ | -۰/۸۱ | -۰/۸۵ | ۰/۶۱ |
| ۱۹۹۷ | ۱/۳۳ | -۰/۹۱ | ۰/۷۶ | ۱/۵۷ | ۰/۲۸ | -۰/۰۴ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | ۲/۶۵ | ۰/۹۴ | ۰/۱۸ | ۱/۲۳ |
| ۱۹۹۸ | -۰/۰۶ | ۰/۱۱ | ۰/۰۳ | ۰/۱۲ | -۰/۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | -۰/۰۳ | ۳/۷۱ | -۰/۴ | -۰/۸۶ | -۰/۸۵ | -۰/۵۹ |
| ۱۹۹۹ | -۰/۳۶ | ۳/۰۱ | -۰/۴۹ | -۱/۱۸ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | ۱ | ۰/۳۷ | ۰/۳۳ | -۰/۴ | -۰/۱۶ | -۰/۶۵ | ۰/۵۲ |
| ۲۰۰۰ | ۱/۲۴ | -۰/۹ | -۱/۱۷ | -۱/۲ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۲۵ | ۲/۰۶ | -۰/۱۳ | -۰/۹ |
| ۲۰۰۱ | -۰/۵۷ | ۰/۴۵ | -۱/۲۴ | -۱/۲ | -۰/۵۱ | ۱/۰۸ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | ۱/۹۷ | -۰/۴ | -۰/۸۶ | ۱/۸۶ | -۰/۰۷ |
| ۲۰۰۲ | -۰/۵۹ | ۰/۲۷ | -۰/۷۶ | -۰/۵۱ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | ۱ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | ۰/۸۳ | -۰/۶۷ | -۰/۹۵ |
| ۲۰۰۳ | -۰/۶۷ | -۰/۱۶ | ۰/۶۲ | ۱/۱ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۱ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | -۰/۸۶ | -۰/۴۳ | -۰/۳ |
| ۲۰۰۴ | ۱/۵۴ | -۰/۹۴ | -۰/۸۱ | ۰/۶۶ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | -۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۳۵ | ۰/۳۵ | ۱/۲۴ | ۰/۳ |
| ۲۰۰۵ | -۰/۵۷ | ۰/۶۷ | -۰/۴۷ | -۱/۱ | -۰/۲۴ | ۲/۶۲ | ۰/۱۹ | -۰/۲۴ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | -۰/۴۴ | -۰/۷۴ | -۰/۷۹ |
| ۲۰۰۶ | -۰/۳۴ | -۰/۵۳ | -۰/۲۷ | ۰/۷۸ | -۰/۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۳۹ | ۰/۱۹ | -۰/۲۴ | -۰/۶۵ |
| ۲۰۰۷ | -۰/۳۵ | ۰/۷۳ | ۰/۲۶ | ۰/۷۵ | -۰/۴۸ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | -۰/۸۶ | -۰/۸۵ | -۰/۱۷ |
| ۲۰۰۸ | ۰/۸۵ | -۰/۹۱ | -۱/۴۱ | ۰/۰۷ | -۰/۲۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | -۰/۳۵ | ۰/۵۶ | -۰/۷ |
| ۲۰۰۹ | -۱/۲۳ | -۰/۸۶ | ۱/۴۲ | ۰/۱۱ | -۰/۴۳ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | -۰/۱۷ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | ۰ | ۰/۱۶ | -۰/۴۱ |
| ۲۰۱۰ | -۰/۹۳ | -۰/۱۳ | -۱/۴ | -۱/۱۸ | -۰/۲۵ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | -۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۲۵ | ۰/۸۶ | -۰/۸۵ | -۱/۸۵ |
| ۲۰۱۱ | -۰/۱۱ | ۲/۱۳ | -۱/۲۶ | -۰/۵۱ | -۰/۵۱ | ۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۴/۳ | -۰/۳۸ | -۰/۳۵ | ۱/۴۳ | -۰/۸۵ | ۰/۳۲ |
| ۲۰۱۲ | -۱/۰۴ | ۱/۴۴ | -۰/۶۶ | -۰/۹ | -۰/۴۷ | -۰/۳۳ | ۰/۳۶ | -۰/۳۷ | ۲/۶۹ | ۰/۵۵ | ۲/۶۲ | ۱/۴۲ | ۰/۹۷ |
| ۲۰۱۳ | -۰/۸ | -۰/۴۸ | -۰/۲۸ | ۱/۷۱ | ۰/۲۶ | -۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۲/۲۴ | -۰/۳۸ | -۰/۴ | ۱/۲۴ | -۰/۸۲ | -۰/۳۳ |
| ۲۰۱۴ | ۱/۱۲ | -۰/۱۹ | ۱/۱۳ | ۰/۳۵ | -۰/۵ | -۰/۳۳ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۳۳ | ۰/۱۴ | -۰/۷۷ | -۰/۲۴ |

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

این نمایه انعطاف بیشتری را در بررسی ویژگی‌های مختلف خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه از خود نشان داد. طبق جدول ۳ در ماه کم‌بارش اوت (۱۰ مرداد تا ۹ شهریور) در مقیاس سه‌ماهه در بیشتر سال‌های دوره آماری با اعداد مشابه و نزدیک به صفر مواجه است که به دلیل افت بارندگی در ماه‌های گرم و خشک‌سال توانایی ارزیابی و مقایسه ایستگاه‌ها از نظر شدت خشک‌سالی وجود ندارد. در ماه‌های گرم از خرداد تا شهریور در این مقیاس در

بیشتر سال‌های بررسی شده یک رده خشک‌سالی با اعداد منفی و مثبت نزدیک به صفر را نمایش می‌دهد و در محاسبه خشک‌سالی/ترسالی با مشکل مواجه می‌شود. برای ماه می (۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد) مقیاس سه‌ماهه عملکرد بهتری را نشان داده است که به دلیل رخداد بارندگی و وقوع نیافتن بارندگی صفر، رده‌های مختلف را به خوبی تعیین کرده است؛ اما در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه در ماه‌های مختلف سال و حتی ماه‌های خشک و کم‌بارش که با نابردن روبه‌رو هستیم، توانایی ارزیابی و مقایسه شدت

نشان داده است که به دلیل نبود مقادیر بارندگی صفر و کاهش شباهت سال‌های آماری و در نتیجه تعیین نوع وضعیت حاکم بوده است؛ اما در مجموع در ماه‌های پربارش و کم‌بارش، SPI ۶ و ۱۲ ماهه بهتر از مقیاس‌های زمانی این نمایه و نمایه‌های دیگر برای واکاوی خشک‌سالی و ترسالی در منطقه مطالعه شده، عمل کرده است.

خشک‌سالی در ایستگاه‌های مختلف وجود دارد. طبق جدول ۳ ملاحظه می‌شود که در سال‌های آماری بررسی شده همه رده‌های مختلف خشک‌سالی و ترسالی در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه را در ماه اوت و می نشان داده است. در ماه تقریباً پرباران می (۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد) نمایه SPI در مقیاس‌های زمانی مد نظر عملکرد بسیار بهتری را از خود

جدول ۳. محاسبه نمایه بارش استاندارد در مقیاس ۳، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه کرمان دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ برای ماه می و اوت

| ماه اوت | | | | ماه می | | | |
|-------------------|------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------------------|--------|
| SPI ^{۱۲} | SPI ^۶ | SPI ^۳ | Year | SPI ^{۱۲} | SPI ^۶ | SPI ^۳ | سال‌ها |
| -۰/۷۱ | -۰/۴۲ | -۰/۰۸ | ۱۹۸۵ | -۱/۵ | -۱/۲۶ | -۰/۳۳ | ۱۹۸۵ |
| ۰/۱۵ | ۰/۹۵ | ۱/۱۸ | ۱۹۸۶ | ۰/۰۳ | ۰/۲۵ | -۰/۸۸ | ۱۹۸۶ |
| ۰/۴۵ | -۰/۳ | ۱/۰۱ | ۱۹۸۷ | ۰/۴۸ | ۰/۲۴ | -۰/۳۷ | ۱۹۸۷ |
| ۰/۳ | ۰/۴۲ | -۰/۰۵ | ۱۹۸۸ | ۰/۳۹ | ۰/۴۲ | -۰/۴۸ | ۱۹۸۸ |
| -۱ | ۰/۷۷ | -۰/۰۸ | ۱۹۸۹ | -۱/۰۱ | -۰/۸۵ | ۰/۸۱ | ۱۹۸۹ |
| -۰/۷ | -۰/۳۴ | ۰/۵۱ | ۱۹۹۰ | -۰/۷۷ | -۰/۸۱ | -۰/۳۲ | ۱۹۹۰ |
| ۰/۶۳ | ۰/۸۸ | -۰/۰۸ | ۱۹۹۱ | ۰/۶۷ | ۰/۷۷ | ۰/۹۲ | ۱۹۹۱ |
| ۱/۳۱ | ۱/۸۵ | ۰/۵۳ | ۱۹۹۲ | ۱/۲۹ | ۱/۵۲ | ۱/۸۲ | ۱۹۹۲ |
| ۱/۴۳ | -۰/۷۶ | -۰/۰۸ | ۱۹۹۳ | ۱/۴۹ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱۹۹۳ |
| -۱/۰۵ | ۰/۷۶ | -۰/۰۸ | ۱۹۹۴ | -۱/۰۷ | -۰/۹۱ | ۰/۸ | ۱۹۹۴ |
| ۱/۹ | ۱/۵۱ | ۱/۵۵ | ۱۹۹۵ | ۱/۷۹ | ۱/۶۲ | ۱/۴ | ۱۹۹۵ |
| ۱/۶۳ | ۱/۰۴ | -۰/۰۸ | ۱۹۹۶ | ۱/۷۷ | ۱/۷۶ | ۱/۰۷ | ۱۹۹۶ |
| ۰/۲۷ | ۱/۰۸ | ۰/۰۹ | ۱۹۹۷ | ۰/۲۶ | ۰/۴۴ | ۱/۱ | ۱۹۹۷ |
| ۰/۵۱ | ۰/۰۸ | ۰/۲۴ | ۱۹۹۸ | ۰/۵۱ | ۰/۱۲ | -۰/۱۲ | ۱۹۹۸ |
| ۰/۴۸ | -۰/۹۶ | ۰/۲۴ | ۱۹۹۹ | ۰/۴۸ | ۰/۶۲ | -۰/۸۹ | ۱۹۹۹ |
| -۱/۹۴ | -۲/۲ | -۰/۰۸ | ۲۰۰۰ | -۱/۹۳ | -۱/۹۶ | -۲/۰۳ | ۲۰۰۰ |
| -۰/۸۱ | -۲/۰۷ | ۰/۶ | ۲۰۰۱ | -۰/۹ | -۱/۲۸ | -۲/۲۸ | ۲۰۰۱ |
| ۰/۲۷ | -۰/۷۹ | ۰/۲۴ | ۲۰۰۲ | ۰/۳ | ۰/۴۳ | -۰/۷۳ | ۲۰۰۲ |
| -۰/۱۵ | ۰/۷۱ | ۰/۵۱ | ۲۰۰۳ | -۰/۱۸ | -۰/۲۴ | ۰/۷۱ | ۲۰۰۳ |
| -۰/۷۹ | -۰/۲۷ | -۰/۰۸ | ۲۰۰۴ | -۰/۷۵ | -۰/۵۸ | -۰/۱۸ | ۲۰۰۴ |
| -۰/۴۳ | -۰/۵۱ | ۱/۲۵ | ۲۰۰۵ | ۰/۳۱ | ۰/۳۷ | -۰/۶۶ | ۲۰۰۵ |
| -۱/۱۷ | ۰/۱۲ | -۰/۰۸ | ۲۰۰۶ | -۱/۰۱ | -۱/۰۵ | ۰/۱۹ | ۲۰۰۶ |
| ۰/۳۷ | ۰/۴ | -۰/۰۸ | ۲۰۰۷ | ۰/۳۸ | ۰/۴۷ | ۰/۴۶ | ۲۰۰۷ |
| -۲ | -۰/۹۵ | -۰/۰۸ | ۲۰۰۸ | -۲/۰۳ | -۱/۸۲ | -۰/۸۳ | ۲۰۰۸ |
| -۰/۲۱ | ۰/۷۷ | ۰/۱۲ | ۲۰۰۹ | -۰/۲۳ | -۰/۰۸ | ۰/۸ | ۲۰۰۹ |
| -۱/۵۳ | -۱/۵۵ | -۰/۰۸ | ۲۰۱۰ | -۱/۵۳ | -۱/۵۵ | -۱/۴ | ۲۰۱۰ |
| ۰/۱۱ | -۰/۶۷ | ۲/۲۶ | ۲۰۱۱ | -۰/۲۱ | ۰ | -۱/۳۱ | ۲۰۱۱ |
| -۰/۵۳ | -۰/۹۷ | -۰/۰۸ | ۲۰۱۲ | -۰/۱۹ | -۰/۷۲ | -۰/۸۵ | ۲۰۱۲ |
| ۱/۲ | ۰/۸۴ | ۱/۵۲ | ۲۰۱۳ | ۱/۰۸ | ۰/۷۳ | ۰/۷۲ | ۲۰۱۳ |
| ۰/۴۴ | ۰/۶۸ | -۰/۰۸ | ۲۰۱۴ | ۰/۶ | ۰/۳۹ | -۰/۷۳ | ۲۰۱۴ |

شاخص دهک بارندگی (DI)

این نمایه وقوع بارندگی‌های طولانی‌مدت را در دهم‌هایی از توزیع نرمال تقسیم می‌کند و هر یک از این گروه‌ها را یک دهک می‌نامند [۳]. با توجه به اینکه نمایه دهک‌های بارندگی مقدار معینی را برای واکاوی شدت خشک‌سالی محاسبه نمی‌کند و فقط طبقه‌بندی مقادیر بارش را انجام می‌دهد، تعیین بیشینه شدت خشک‌سالی در منطقه امکان‌پذیر نیست. بنابراین، از روی فراوانی ماه‌هایی که یک سال معین در هر دهک قرار داده است می‌توان سال یا سال‌هایی که خشک‌سالی بسیار شدیدی را تجربه کرده‌اند، مشخص کرد. با توجه به جدول ۴ در ماه جولای که در بیشتر سال‌های دوره آماری با نبود بارندگی مواجهیم، نمایه دهک بارندگی قادر به جداسازی سال‌های مختلف از نظر رده‌های مختلف خشک‌سالی را نداشته و نوع آن را در سال‌های بررسی شده در وضعیت یکنواخت نرمال مشخص کرده است (جدول ۴). این نمایه همچون نمایه‌های ZSI و CZI وضعیت را در ماه‌های کم‌بارش و گرم سال به شکل نرمال تعیین کرده که نسبت به شاخص‌های استاتیک RAI، SIAP و PN که شدت خشک‌سالی را به‌صورت بسیار شدید نشان داده‌اند، کارایی بهتری داشته است، اما در مقایسه با نمایه SPI ۶ و ۱۲ ماهه همه نمایه‌های یادشده کاملاً ضعیف عمل کرده‌اند.

شاخص درصد از نرمال بارندگی (PN)

در ایستگاه‌های مناطق مرطوب که در همه سال و به‌ویژه ماه‌های خشک با رخداد بارندگی روبه‌رو هستند همچون نوار شمالی کشور، امکان استفاده از این نمایه برای پایش و مقایسه سال‌های آماری و همه ماه‌ها از لحاظ شدت خشک‌سالی وجود دارد؛ اما در ایستگاه‌های نواحی خشک شرق و جنوب شرقی ایران مانند کرمان به دلیل وقوع نیافتن بارندگی و شباهت اعداد، توانایی محاسبه شدت خشک‌سالی را در ماه‌های گرم طی سال‌های آماری را ندارد. جدول ۴ نمونه از ماه کم‌بارش جولای را برای سال‌های خشک فراگیر براساس نمایه‌های بررسی شده نشان می‌دهد. طبق جدول شدت خشک‌سالی برای ماه جولای در سال‌های مد نظر همگی شبیه نمایه‌های SIAP و RAI خشک‌سالی بسیار شدید را نمایش داده است؛ و رفتار این سه نمایه متفاوت از دیگر نمایه‌ها بوده است.

شاخص ناهنجاری بارندگی (RAI)

در این نمایه نیز در ماه‌های گرم و کم‌باران سال وضعیت یکنواختی را از شدت خشک‌سالی نشان می‌دهد (جدول ۴). در حالی که برای ماه پرباران فوریه طبق جدول ۴ رده‌های مختلف خشک‌سالی و ترسالی را نمایش داده است و قابلیت مقایسه سال‌های آماری از نظر شدت خشک‌سالی وجود دارد. همان‌طور که دیده می‌شود در مقایسه با نمایه SPI ۶ و ۱۲ ماهه که توانسته‌اند وضعیت‌های مختلف را در هر سال به‌خوبی تعیین کنند، این نمایه قادر به بررسی خشک‌سالی در ماه‌های کم‌باران سال نیست. در مقابل هم به‌علت کاهش شدید باران در فصل گرم سال با رخداد ۱ میلی‌متر بارندگی، وضعیت ترسالی بسیار شدید را نشان می‌دهد که بیانگر ناتوانی در بررسی ماه‌های کم‌باران سال توسط این نمایه است.

شاخص نیچه (NICHE)

در این نمایه ابتدا با استفاده از معادلات روش نیچه (معادلات ۸ تا ۱۰)، ابتدا آستانه ترسالی، خشک‌سالی و نرمال بودن برای هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی محاسبه شد. سپس، تفکیک سال‌های مرطوب، خشک و نرمال تعیین شد. در این تحقیق به‌منظور بررسی پدیده خشک‌سالی و ترسالی نمایه نیچه به دلیل نیاز آماری کمتر و سهولت محاسبات، روشی ساده برای رسیدن به اهداف است؛ اما از آنجا که فقط به تفکیک خشک‌سالی، ترسالی و بارش نرمال می‌پردازد و به‌شدت وقوع توجهی ندارد، کارایی کمتری را از خود نشان می‌دهد و در واقع ضعیف‌ترین نمایه بررسی شده است.

شاخص Z چینی (CZI)

ارزیابی شدت خشک‌سالی در مقیاس ماهیانه در نمایه Z چینی برای ماه جولای در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ که با خشک‌سالی‌های فراگیر شدید و متوسط روبه‌رو بوده‌اند، نشان داد نتایج عملکرد بهتری را در مقایسه با نمایه‌های RAI، PN و SIAP داشته است. همچنین این نمایه با نمایه‌های ZSI و SPI در مقیاس سه‌ماهه شباهت دارد. به‌گونه‌ای که در این نمایه در ماه کم‌باران سال با توجه به جدول ۴ که با مقادیر بارندگی صفر یا رخ‌ندادن بارندگی مواجهیم، شدت خشک‌سالی را نرمال نشان داده است.

شاخص معیار بارندگی سالانه (SIAP)

نمایه معیار بارندگی سالانه نیز از لحاظ عملکرد همانند نمایه‌های ناهنجاری بارندگی سالانه و درصدی از نرمال بارندگی است به‌صورتی که با رسیدن به فصل گرم و خشک و قطع بارندگی‌ها، شدت خشک‌سالی را بیش از حد و به‌صورت یکسان برای هر سه سال نمونه وضعیت خشک‌سالی بسیار شدید را نشان داده است؛ اما این نتایج در نمایه SPI ۶ و ۱۲ ماهه دیده نمی‌شود به‌گونه‌ای که این

نمایه‌ها به‌خوبی توانسته‌اند رده‌های مختلفی از شدت خشک‌سالی را به نمایش بگذارند؛ اما برای ماه پرباران فوریه نمایه معیار بارندگی سالانه کاملاً منطبق بر شرایط رخ داده عمل کرده و در ماه فوریه برای سال‌های فراگیر ترسالی در منطقه نیز شبیه نمایه ناهنجاری بارندگی سالانه و دهک بهترین عملکرد را در میان نمایه‌های بررسی شده برای ماه‌های پرباران داشته است.

جدول ۴. مقایسه نمونه‌ای از ماه کم‌بارش و پربارش خروجی نمایه‌های بررسی شده در ایستگاه کرمان در ماه‌های جولای و فوریه

| جولای | CZI | DI | SIAP | PN | RAI | SPI3 | SPI6 | SPI12 | ZSI |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| ۲۰۰۱ | نرمال | نرمال | خ ب ش | خ ب ش | خ ب ش | نرمال | نرمال | نرمال | نرمال |
| ۲۰۰۸ | نرمال | نرمال | خ ب ش | خ ب ش | خ ب ش | نرمال | خ ش | خ ب ش | نرمال |
| ۲۰۱۰ | نرمال | نرمال | خ ب ش | خ ب ش | خ ب ش | نرمال | خ م | خ شدید | نرمال |
| فوریه | CZI | DI | SIAP | PN | RAI | SPI3 | SPI6 | SPI12 | ZSI |
| ۱۹۹۸ | ت ش | ت ش | ت م | نرمال | ت ب ش | نرمال | نرمال | ت م | نرمال |
| ۲۰۰۴ | ت ب ش | ت ب ش | ت ش | ت ب ش | ت ب ش | نرمال | نرمال | نرمال | ت شدید |
| ۲۰۱۳ | نرمال | خ ش | خ م | خ ش | خ ش | نرمال | خ م | نرمال | نرمال |

توضیح: خ ب ش: خشک‌سالی بسیار شدید، خ ش: خشک‌سالی شدید، م: خشک‌سالی متوسط، ت ب ش: ترسالی بسیار شدید، ت ش: ترسالی شدید، ت م: ترسالی متوسط.

در پاسخ به این سؤال که برای ارزیابی شدت خشک‌سالی در یک منطقه کدام شاخص گویاتر و دقیق‌تر است؟ براساس الگوی تحقیقاتی ارزیابی کارایی چند نمایه خشک‌سالی هواشناسی در نمونه‌های اقلیمی ایران خلیلی و بذرافشان [۱۱] از یک فرضیه به‌عنوان سنجه کارآمد برای پایش خشک‌سالی استفاده شد. در این تحقیق کارایی نمایه‌های خشک‌سالی برای واکاوی خشک‌سالی‌های هواشناسی منطقه مطالعه شده بررسی شد. برای دست‌یافتن به چنین نتیجه‌ای کمینه مقدار بارندگی طی یک دوره بلندمدت اقلیمی که منعکس‌کننده خشک‌سالی هواشناسی بسیار شدیدی است که در منطقه بررسی شده رخ داده است. مطابق این فرضیه ابتدا کمینه مقادیر بارندگی در هر یک از ایستگاه‌ها استخراج و توسط نمایه‌های خشک‌سالی ارزیابی شد. جدول‌های ۵ و ۶ به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار بارندگی و سال وقوع آن را به همراه پایش وضعیت جوّی از دیدگاه نمایه‌های

خشک‌سالی نشان می‌دهد. براساس نتایج نمایه‌های RAI و DI بهترین عملکرد برای پایش خشک‌سالی هواشناسی را نشان دادند. به‌بیانی، در همه ایستگاه‌ها کمینه مقدار بارندگی ۳۰ ساله با خشک‌سالی بسیار شدید در این دو نمایه انطباق داشت. ضعیف‌ترین کارایی هم به نمایه نیچه تعلق داشت که در همه ایستگاه‌ها کمینه بارندگی را به‌عنوان خشک‌سالی بدون توجه به میزان شدت خشک‌سالی در نظر گرفته بود. نکته جالب توجه اینکه در واکاوی تقارن سال‌های وقوع بیشینه مقدار بارندگی با ترسالی بسیار شدید نیز نمایه‌های RAI و DI بهترین کارایی برای پایش ترسالی‌های منطقه را داشتند. ملاحظه می‌شود که نمایه‌های SPI و PN در بررسی وضعیت خشک‌سالی عملکردی شبیه به هم را داشته‌اند. نمایه SPI نیز که در بیشتر تحقیقات استفاده شده محققان است عملکرد ضعیف‌تری را نسبت به نمایه‌های RAI و DI داشته است.

جدول ۵. تقارن سال وقوع کمینه بارندگی با خشک‌سالی‌های بسیار شدید هواشناسی در منطقه مطالعه‌شده

| ایستگاه | سال وقوع کمینه | بارش | NICHE | DI | CZI | SIAP | RAI | ZSI | SPI | PN |
|---------------|----------------|-------|-------|----|-----|------|-----|-----|-----|----|
| کاشان | ۱۹۸۵ | ۶۲/۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۳ |
| سیرجان | ۱۹۸۷ | ۳۷/۷ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۴ |
| خور و بیابانک | ۲۰۰۵ | ۳۵/۱ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۳ |
| اصفهان | ۲۰۰۸ | ۴۰/۸ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| اردستان | ۲۰۰۸ | ۶۰/۵ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| نجف‌آباد | ۲۰۰۸ | ۴۳/۱ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| میرم | ۲۰۰۸ | ۱۷۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| نابین | ۲۰۰۸ | ۵۰/۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| فریدون‌شهر | ۲۰۱۰ | ۸۶/۴ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| گلپایگان | ۲۰۱۰ | ۱۱۲/۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| شرق اصفهان | ۲۰۰۸ | ۳۸/۱ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| انار | ۲۰۱۰ | ۷/۱ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| بم | ۲۰۱۰ | ۱۴/۶ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۴ |
| کرمان | ۲۰۱۰ | ۴۱/۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| شهر بابک | ۲۰۱۰ | ۲۰/۷ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| یزد | ۲۰۱۰ | ۹/۳ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| طیس | ۲۰۱۳ | ۵۱/۷ | ۱ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۲ |
| ابرکوه | ۲۰۰۸ | ۱۷/۱ | ۱ | ۴ | ۲ | ۳ | ۴ | ۲ | ۳ | ۲ |
| رباط | ۲۰۱۰ | ۵۵/۶ | ۱ | ۴ | ۳ | ۲ | ۴ | ۱ | ۲ | ۲ |
| عقدا | ۲۰۱۰ | ۱۹/۷ | ۱ | ۴ | ۲ | ۳ | ۴ | ۲ | ۲ | ۲ |
| مجموع | | | ۲۰ | ۸۰ | ۶۰ | ۷۵ | ۸۰ | ۶۱ | ۷۰ | ۷۰ |
| رتبه شاخص | | | ۶ | ۱ | ۵ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۳ |

توضیح: ۱: خشک‌سالی، ۲: خشک‌سالی متوسط، ۳: خشک‌سالی شدید، ۴: خشک‌سالی بسیار شدید.

جدول ۶. تقارن سال وقوع بیشینه بارندگی با ترسالی‌های شدید و بسیار شدید هواشناسی در منطقه مطالعه‌شده

| نام ایستگاه | سال وقوع پیشینه | بارش | NICHE | DI | CZI | SIAP | ZSI | SPI | PN | RAI |
|---------------|-----------------|-------|-------|----|-----|------|-----|-----|----|-----|
| کاشان | ۱۹۸۶ | ۲۳۳ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| سیرجان | ۱۹۹۲ | ۲۵۳ | ۱ | ۴ | ۳ | ۳ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| خور و بیابانک | ۱۹۹۶ | ۱۳۸ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| اصفهان | ۲۰۰۶ | ۲۵۰ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| اردستان | ۲۰۰۹ | ۲۰۵/۶ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| نجف‌آباد | ۲۰۰۶ | ۲۷۳/۸ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| سمیرم | ۲۰۰۴ | ۹۸۰ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| نابین | ۱۹۹۹ | ۱۸۱/۲ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| فریدون‌شهر | ۲۰۰۶ | ۸۶۸ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ |
| گلپایگان | ۱۹۹۳ | ۴۳۷ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۳ | ۴ |
| شرق اصفهان | ۱۹۹۳ | ۱۹۱ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| انار | ۱۹۸۶ | ۱۶۹ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۴ |
| بم | ۱۹۹۱ | ۱۲۱ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| کرمان | ۱۹۹۲ | ۲۴۲ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| شهر بابک | ۱۹۹۲ | ۲۸۰ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۳ | ۲ | ۴ |
| یزد | ۱۹۸۶ | ۱۱۸ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| طیس | ۱۹۹۱ | ۱۹۱ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| ابرکوه | ۲۰۰۴ | ۱۱۲ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۳ | ۴ |
| رباط | ۲۰۱۲ | ۱۶۳ | ۱ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ |
| عقدا | ۲۰۱۳ | ۱۲۰/۱ | ۱ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| مجموع | | | ۲۰ | ۸۰ | ۷۷ | ۷۸ | ۷۲ | ۶۵ | ۷۵ | ۸۰ |
| رتبه شاخص | | | ۷ | ۱ | ۳ | ۲ | ۵ | ۶ | ۴ | ۱ |

توضیح: ۱: ترسالی، ۲: ترسالی متوسط، ۳: ترسالی شدید، ۴: ترسالی بسیار شدید.

جدول ۷. شدت، تداوم، فراوانی و فراگیری خشک‌سالی‌های منطقه طبق نمایه RAI طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴

| ایستگاه | شدیدترین سال | طولانی‌ترین تداوم | فراوانی وقوع | سال وقوع کمینه بارش |
|---------------|--------------|-------------------|--------------|---------------------|
| کاشان | ۴/۸۸- | ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۱ | ۱۵ | ۱۹۸۵ |
| سیرجان | ۴/۱۷- | ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۰ | ۱۶ | ۱۹۸۷ |
| خور و بیابانک | ۴/۷۸- | ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ | ۱۵ | ۲۰۰۵ |
| اصفهان | ۴/۹۷- | ۹۹ تا ۲۰۰۱ | ۱۶ | ۲۰۰۸ |
| اردستان | ۴/۲۴- | ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ | ۱۴ | ۲۰۰۸ |
| نجف‌آباد | ۴/۷۳- | ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ | ۱۴ | ۲۰۰۸ |
| سمیرم | ۳/۶۴- | ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ | ۱۲ | ۲۰۰۸ |
| نابین | ۴/۵۵- | ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ | ۱۴ | ۲۰۰۸ |
| فریدون‌شهر | ۴/۱۳- | ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ | ۱۰ | ۲۰۱۰ |
| گلپایگان | ۴/۰۹- | ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ | ۹ | ۲۰۰۸ |
| شرق اصفهان | ۵- | ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۰ | ۱۳ | ۲۰۰۸ |
| انار | ۵/۷۷- | ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ | ۱۷ | ۲۰۱۰ |
| بم | ۴/۲۷- | ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ | ۱۷ | ۲۰۱۰ |
| کرمان | ۵/۷۳- | ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ | ۱۷ | ۲۰۱۰ |
| شهر بابک | ۵/۹۷- | ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ | ۱۶ | ۲۰۱۰ |
| یزد | ۵/۸۴- | ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ | ۱۷ | ۲۰۱۰ |
| طبس | ۳/۳۸- | ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ | ۱۷ | ۲۰۱۳ |
| ابركوه | ۴/۸۵- | ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ | ۱۷ | ۲۰۰۸ |
| رباط | ۴/۷۹- | ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ | ۱۶ | ۲۰۱۰ |
| عقدا | ۵/۴۸- | ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ | ۱۷ | ۲۰۱۰ |

طی دوره ۳۰ ساله ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در سال ۲۰۰۸ با توجه به جدول ۷ به ترتیب ایستگاه‌های شرق اصفهان، اصفهان و نجف‌آباد، شدیدترین خشک‌سالی را طبق نمایه ناهنجاری بارندگی داشته‌اند. همچنین بیش از ۸ ایستگاه که بیشتر آنها در استان اصفهان واقع شده‌اند در حالت فراگیر شدیدترین خشک‌سالی ۳۰ ساله را تجربه کرده‌اند (شکل ۲-الف). اما در سال ۲۰۱۰ در مقایسه با سال ۲۰۰۸ شدت خشک‌سالی بیشتر بوده به گونه‌ای که در همه ایستگاه‌ها مقادیر منفی ثبت شده است و از نظر فراگیری شدیدترین خشک‌سالی نیز همانند سال ۲۰۰۸ در ۸ ایستگاه، اما در استان‌های کرمان و یزد قرار دارند (شکل ۲-ب).

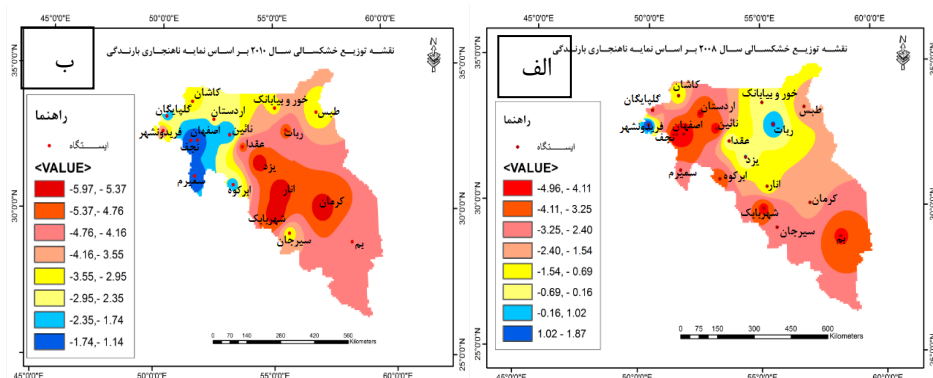
برای مقایسه کارایی بهترین نمایه یعنی ناهنجاری بارندگی (RAI) و نمایه کاربرد بارش استاندارد شده (SPI)، درصد فراوانی رده خشک‌سالی بسیار شدید طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ در منطقه مطالعه شده ترسیم شد (شکل ۳). طبق شکل (۳-الف) در نمایه RAI در کل منطقه مقادیر خشک‌سالی بسیار شدید مشاهده می‌شود؛ که کاملاً در

با توجه به اینکه نمایه ناهنجاری بارندگی RAI در میان ۸ نمایه خشک‌سالی بهترین کارایی برای پایش ترسالی و خشک‌سالی‌های منطقه را داشت؛ بدین‌منظور با استفاده از این نمایه چهار ویژگی مهم در هر خشک‌سالی یعنی شدت، تداوم، فراوانی و فراگیری یا گستره خشک‌سالی در جدول ۷ را نشان می‌دهد. شدیدترین خشک‌سالی در ایستگاه شهر بابک واقع در استان کرمان با ۵/۹۸- در سال ۲۰۱۰ به ثبت رسیده است. بیشترین تداوم خشک‌سالی نیز در همین ایستگاه از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ بوده است. بیشترین فراوانی هم در ایستگاه‌های انار، بم، کرمان، یزد، طبس و ابرکوه با ۱۷ رخداد طی ۳۰ سال دوره آماری دیده شد. با توجه به سال وقوع کمینه بارش مشخص شد که فراگیرترین سال که منطبق بر شدیدترین خشک‌سالی‌ها در منطقه بررسی شده بود در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ هریک با ۸ ایستگاه مشاهده شد. در همه ایستگاه‌ها مقادیر منفی نمایه RAI ثبت شده بود. سال‌های یادشده در واقع بزرگ‌ترین خشک‌سالی‌های رخ داده طی نیم‌قرن اخیر در استان‌های بررسی شده است.

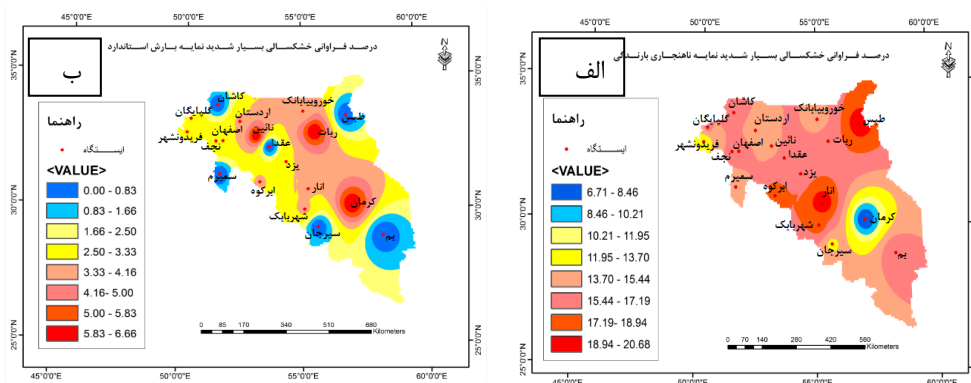
شکل ۲ فراگیرترین و شدیدترین خشک‌سالی رخ داده را

داده است که این ویژگی بیانگر ناتوانی در نمایش رده خشک‌سالی بسیار شدید و شرایط واقعی خشک‌سالی حاکم بر این مناطق است. در بقیه ایستگاه‌ها نیز میزان درصد فراوانی را کمتر از نرمال نشان داده است.

انطباق با مقادیر بارندگی و مقادیر خروجی نمایه RAI در سال‌های آماری است؛ اما در نمایه SPI (شکل ۳-ب) در ایستگاه‌های واقع در جنوب کرمان، شمال اصفهان و یزد درصد فراوانی رده خشک‌سالی بسیار شدید را صفر نشان



شکل ۲. توزیع خشک‌سالی براساس نمایه RAI طی شدیدترین و فراگیرترین (الف سال ۲۰۰۸، ب) سال ۲۰۱۰



شکل ۳. درصد فراوانی رده خشک‌سالی بسیار شدید (الف) نمایه ناهنجاری بارندگی (RAI)، (ب) نمایه بارش استاندارد (SPI)

رخندادن بارش و ثبت داده‌های صفر در ماه‌های کم‌باران، شرایط را یکسان و غالباً به صورت خشک‌سالی بسیار شدید نشان می‌دهند؛ اما در ماه‌های پر باران عملکرد بهتری در نمایش شرایط مختلف خشک‌سالی دارند. در مجموع نمایه‌های SPI ۶ و ۱۲ ماهه بهترین عملکرد را در بررسی خشک‌سالی ماهانه داشته‌اند. سپس نمایه‌های DI، CZI، ZSI، SPI شبیه به هم عمل کرده‌اند و در رتبه دوم قرار می‌گیرند. این نمایه‌ها شدت خشک‌سالی را به صورت نرمال نمایش داده‌اند. در آخر نیز نمایه‌های RAI، PNPI و SIAP شدت خشک‌سالی را همانند هم بیان کرده‌اند و در جایگاه سوم هستند. در واقع، در فصل تابستان به دلیل نفوذ پرفشار جنب حاره و انحراف

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای نخستین بار وضعیت خشک‌سالی استان‌های نیمه شرقی و جنوب شرقی کشور با استفاده از ۸ نمایه بررسی شده است تا بهترین نمایه در مقیاس ماهانه و سالانه برای شناسایی و واکوی خشک‌سالی مشخص شود. نتایج خروجی نمایه‌ها در مقیاس ماهانه نشان داد نمایه‌های SPI ۶ و ۱۲ ماهه برای بررسی خشک‌سالی‌ها بهترین کارایی را دارند و حتی در ماه‌های کم‌باران که با مشکل رخندادن بارندگی مواجه می‌شوند نیز ارزیابی‌های دقیق از وضعیت خشک‌سالی را نشان می‌دهند. در حالی که SPI سه‌ماهه و نمایه‌های استاتیک همچون RAI، DI، PN، PNPI به دلیل

نشان داد برای پایش خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های ایران به‌ویژه مناطق خشک و بیابانی مرکزی و شرقی کشور باید دقت و کارایی نمایه‌های متفاوت واکاوی شود و تصمیمات فقط براساس یک نمایه صورت نگیرد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای بررسی خشک‌سالی ابتدا نمایه‌های خشک‌سالی متناسب با هدف تحقیق ارزیابی شود و پس از انتخاب بهترین نمایه وضعیت خشک‌سالی‌ها طبق نمایه برگزیده تحلیل شود تا با برنامه‌ریزی مرتبط با نوع وضعیت حاکم خسارت احتمالی، هزینه‌ها و اتلاف انرژی را به حداقل رساند. نتایج این تحقیق با پژوهش‌های انصافی مقدم [۳] برای حوضه دریاچه نمک، پیری و همکارانش [۱۹] در مقایسه چهار نمایه خشک‌سالی برای استان سیستان و بلوچستان و همچنین شایق و سلطانی [۲۲] برای استان یزد، تحقیق انطباق داشته است؛ اما انتخاب ۸ نمایه پرکاربرد در تحقیقات، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای مقایسه بهترین نمایه یعنی RAI و نمایه پرکاربرد SPI در نمایش درصد فراوانی رده خشک‌سالی بسیار شدید و انتخاب منطقه وسیع ایران مرکزی بر صحت و دقت نتایج افزوده است. همچنین معایب و مزایای هر نمایه خشک‌سالی در مقیاس ماهانه و سالانه بررسی و مقایسه شده است. این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان «طرح کلان آمایش دفاعی-امنیتی جمهوری اسلامی ایران در مناطق کویری، بیابانی و سواحل مکران» است که در پژوهشکده آماد و فناوری دفاعی، پژوهشگاه راهبردی دانا (مرکز تحقیقات راهبردی دفاعی) به انجام رسیده است.

منابع

- [1].Alijani B, and Kaviani MR. Principles of Climatology. 6nd ed. Tehran: Samt; 2011.
- [2].Beroughani M, Taie M, Sydkhalaq m. Analyze the relationship between hydrological and climatological droughts Plains Sabzevar using SWI and SPI indices. Range and Desert Reasearch Iranian Journal. 2013; 4(20): 733-744. [Persian]
- [3].Ensafi Moghadam T. Evaluation of climatic drought index and determine the best index in the Salt Lake basin. Range and Desert Reasearch Iranian Journal. 2007; 14 (2): 271-288. [Persian]
- [4].Farajzadeh M. Climatology techniques. 7nd ed. Tehran: Samt; 2015.

بادهای غربی به سمت عرض‌های بالاتر در بیشتر ایران با قطع بارش و پایداری هوا مواجهیم [۱]. بنابراین، خشکی بیشتر مناطق کشور در این فصل طبیعی است و کاربرد نمایه‌های خشک‌سالی در ماه‌های پربارش سال که بیشتر نزولات جوی رخ می‌دهد، اهمیت زیادی دارد؛ اما در مقیاس سالانه با توجه به جدول‌های ۵ و ۶ یعنی تقارن سال وقوع کمینه و بیشینه بارندگی طی ۳۰ سال دوره آماری نمایه‌های RAI و DI در کل دوره مقادیر کمینه بارندگی هر ایستگاه را منطبق بر خشک‌سالی بسیار شدید نشان داده بودند؛ که رتبه‌های اول را به دست آورده‌اند ضعیف‌ترین عملکرد نیز در نمایه نیچه دیده شد که وضعیت خشک‌سالی را بدون توجه به شدت آن و تنها با سه رده خشک‌سالی نمایش داد. نکته جالب اینکه نمایه پرکاربرد SPI در بررسی خشک‌سالی‌ها در مقیاس سالانه کارایی کمتری را نسبت به RAI و DI نشان داد و مشابه با نمایه PN در رتبه سوم قرار گرفت. در مقایسه بین نمایه‌ها نیز بیشترین شباهت بین نمایه‌های RAI، DI و SIAP با هم و نمایه‌های SPI و PN نیز در یک دسته و CZI و ZSI نیز در دسته دیگر قرار می‌گیرند. با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) کارایی نمایه‌های RAI و SPI در نمایش رده خشک‌سالی بسیار شدید طی دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ نشان داده شد. در نمایه RAI در کل منطقه بررسی‌شده رده خشک‌سالی بسیار شدید نشان داده شد؛ و مقادیر درصد فراوانی منطبق بر شرایط واقعی حاکم بر منطقه توزیع شده بود؛ اما در نمایه SPI در چندین ایستگاه از نشان دادن رده خشک‌سالی بسیار شدید ناتوان بود و مقادیر درصد فراوانی رده خشک‌سالی بسیار شدید را در سایر ایستگاه‌ها کمتر از حد انتظار و در تضاد با شرایط واقعی مناطق نمایش داده شده بود. در مرحله بعد شدیدترین، متداوم‌ترین، بیشترین فراوانی گستره خشک‌سالی برای هر ایستگاه در طول دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۱۴ طبق بهترین نمایه یعنی RAI مشخص شد. شدیدترین با ۵/۹۸- در سال ۲۰۱۰ و متداوم‌ترین خشک‌سالی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ مختص به ایستگاه شهر بابک واقع در استان کرمان بود. بیشترین فراوانی خشک‌سالی در استان‌های یزد و کرمان با ۱۷ مورد دیده شد. فراگیرترین خشک‌سالی بسیار شدید نیز در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ که در هر دو سال بیش از ۸ ایستگاه را فرا گرفته بود. شدیدترین خشک‌سالی‌ها نیز در کل منطقه مطالعه‌شده در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ به وقوع پیوسته است. نتایج این پژوهش

- [5]. Gibbs WJ, and Maher JV. Rainfall deciles as drought indicate. Bulletin. Bureau. Journal of Meteorology, 1967; 48: 34-41.
- [6]. Gao Y, Markkanen T, Thum T, Aurela M, Lohila A, Mammarella A, Kämäräinen M, Hagemann S, Aalto T. Assessing various drought indicators in representing summer drought in boreal forests in Finland. Journal of Hydrol Earth Syst Sci. 2016; 20:175-191.
- [7]. Homdee T, Pongput K, Kanae S. A comparative performance analysis of three standardized climatic drought indices in the Chi River basin, Thailand. Journal of Agriculture and Natural Resources. 2016; 50: 211-219.
- [8]. Hussaini Seyed A, Arghavani A, Azadi mobaraki M, Mohammadpur K. Drought monitoring and trends in the city of Sanandaj. The fifth regional conference on findings of Agriculture. University of Kurdistan. 2011.
- [9]. Jun LY, ZX D, LU F, MA J. Analysis of drought evolution characteristics based on standardized Precipitation index in the Huaihe River Basin. Journal of Procedia Eng. 2012; 28: 434 - 437.
- [10]. Jahangir MH, Khoshmashraban M, Yousefi H. Drought monitoring with Standard Precipitation Index (SPI) and drought forecasting with Multi-layers perceptron. (Case study: Tehran and Alborz Provinces). Iranian Journal of Ecohydrology. 2016; 2 (4):417-428.
- [11]. Khalili A, Bazrafshan J. Evaluation of the effectiveness of several examples of climate meteorological drought indices in Iran. Journal of weather. 2003; 48: 79-93.
- [12]. Karimi M, Shahedi K, Khosravi K, Edrisi T. Evaluation of interpolation methods in order to meteorological drought zoning in the plains of Neka-Sari, Journal of natural environmental hazards. 2016; 7:13-28.
- [13]. Kendall MG, and Stuart A. The advanced theory of statistics. 7th ed. London: Charles Griffin & Company; 1997.
- [14]. Mirzaee A, and Gholamali S. software specialized water engineering. 1st ed. Tehran: Qian green computing; 2011.
- [15]. Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J. Drought monitoring with multiple time scales. Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society. Jan 15- 20, Dallas TX. 1995; 233-236.
- [16]. Naserzadeh MH, Ahmadi E. Evaluation of indices of meteorological drought in drought monitoring and mapping of them in Qazvin province. Journal of Applied research Geographic Sciences. 2012; 2(27): 141-162.
- [17]. Nikbakht J, Tabari H, Talaei P. Streamflow drought severity analysis by percent of normal index (PNI) in northwest Iran. Journal of Theoretical and applied climatology. 2013; 112(3-4):565-573.
- [18]. Naumann G, Dutra E, Barbosa P, Pappenberger F, Wetterhall F, Vogt V. Comparison of drought indicators derived from multiple data sets over Africa. Hydrol. Earth Syst Sci. 2014; 18:1625-1640.
- [19]. Piri H, Rahdari V, Maleki S. Check and compare the performance of four meteorological drought indices in drought risk management Sistan-Baluchistan province. Journal of Irrigation and water. 2013; 11: 96-114.
- [20]. Rezie T. Characteristics of drought in arid and semi-arid region of Iran. Journal of Watershed Engineering and Management. 2016; 7 (4):363-378.
- [21]. Rooy M, and Van P. A rainfall anomaly index independent of time and space. Journal of Notos. 1965; 14: 43-48.
- [22]. Shayegh E, and Soltani S. Comparison of drought in Yazd province. Journal of Soil and Water Sciences. 2010; 57: 231-250.
- [23]. Sebghati M, Ahmadi Birgani H, Moghaddam A. The calculation of continuity and intensity of droughts using modified SPEI index (case study: Tabriz and Urmia Cities). Journal of Environ and Water Eng. 2016; 2(2): 188-195.
- [24]. Wilks DS. International variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. Journal of Agricultural and forest meteorology. 1998; 99: 547-554.