

## انتخاب شاخص خشکسالی SPI مناسب با تکیه بر وضعیت آب‌های زیرزمینی در دشت یزد- اردکان

علیرضا نسیمی<sup>۱</sup> و زرغام محمدی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

پدیده خشکسالی اثرات قابل توجهی را در ابعاد مختلف، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مانند استان یزد دارد. به طور معمول برای ارزیابی وضعیت خشکسالی در مناطق مختلف، از شاخص‌های متداول استفاده می‌شود. اما در این پژوهش تلاش شده است که شاخصی با کارایی منطقه‌ای برای ارزیابی شدت خشکسالی در دشت یزد- اردکان، انتخاب شود. بنابراین، در این پژوهش، شاخص خشکسالی SPI مناسب براساس وضعیت آب‌های زیرزمینی انتخاب شده است. با توجه به این که شاخص بارش استاندارد، شاخصی با قابلیت انعکاس وضعیت منابع آب تشخیص داده شده است، به بررسی و ارزیابی هماهنگی مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد با وضعیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد- اردکان با استفاده از هیدروگراف واحد دشت و تغییرات زمانی سطح ایستابی در پیزومترها پرداخته شده است. نتایج نشان داد که در منطقه مورد بررسی بهترین هماهنگی بین نوسانات سطح ایستابی و شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه وجود دارد. از این‌رو شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه به عنوان شاخص خشکسالی مناسب دشت یزد- اردکان انتخاب و معرفی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** خشکسالی، دشت یزد- اردکان، شاخص خشکسالی مناسب، شاخص بارش استاندارد (SPI).

ارجاع: نسیمی ع. و محمدی ض. ۱۳۹۵. انتخاب شاخص خشکسالی SPI مناسب با تکیه بر وضعیت آب‌های زیرزمینی در دشت یزد- اردکان. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰: ۲۱. ۱۷۵-۱۸۱.

۱- دانشجوی دکترای زمین‌شناسی - آشناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.

۲- استادیار بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.

\* نویسنده مسئول: [zmohammadi@shirazu.ac.ir](mailto:zmohammadi@shirazu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۱۰

## مقدمه

پدیده خشکسالی اثرات منفی بزرگی بر منابع آب دارد. در پژوهش‌های مربوط به پایش خشکسالی، در راستای ارزیابی تأثیر خشکسالی بر وضعیت منابع آب و کشاورزی، شاخص‌هایی تعریف شده است (شمس‌نیا و همکاران، ۱۳۸۸). با محاسبه شاخص خشکسالی تصویر جامعی از عوامل مؤثر در خشکسالی فراهم می‌شود.

انصافی‌مقدم (۱۳۸۶) برای انتخاب بهترین شاخص خشکسالی، کمترین مقدار بارندگی طی یک دوره بلندمدت اقلیمی را منعکس کننده خشکسالی هواشناسی بسیار شدید در نظر گرفت. در این روش شاخصی که در تعداد ایستگاه‌های بیشتری کمترین مقدار بارندگی را به عنوان خشکسالی بسیار شدید نشان دهد، به عنوان شاخص خشکسالی مناسب انتخاب می‌شود. کاظمی و همکاران (۱۳۸۷ الف) پس از محاسبه شش شاخص خشکسالی در استان همدان و بررسی همبستگی بین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌کارگیری ضریب‌های همبستگی آماری به تنهایی قادر به انتخاب مناسب‌ترین شاخص نیست. در پژوهشی دیگر کاظمی و همکاران (۱۳۸۷ ب) پس از محاسبه هفت شاخص خشکسالی در استان همدان نتیجه گرفتند اگرچه برخی از شاخص‌ها از نظر عددی با یکدیگر ضریب همبستگی بالایی دارند، ولی در تحلیل کلاستر، فراوانی سال‌هایی از این شاخص‌ها که در یک طبقه قرار می‌گیرند، ممکن است در دو گروه جداگانه قرار گیرند.

از نظر فیوریلو و گوداگنو (۲۰۱۰)، شاخص بارش استاندارد توانایی کمی کردن کمبود بارش برای مقیاس‌های زمانی مختلف را دارد. بنابراین، برای ارزیابی همبستگی دبی چشمه‌ها با مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد، سری زمانی شاخص بارش استاندارد را با سری زمانی تغییرات میانگین دبی چشمه‌ها تطابق دادند.

با مقایسه روش‌های مختلف انتخاب شاخص خشکسالی مناسب، به نظر می‌رسد که انتخاب شاخص خشکسالی مناسب با توجه به وضعیت منابع آب، بر اساس روش فیوریلو و گوداگنو (۲۰۱۰)، دارای اعتبار بیشتری است. در این راستا، بهترین روش برای انتخاب شاخص خشکسالی مناسب، توجه به هدف پژوهش و بررسی از قبیل وضعیت آب‌های زیرزمینی یا سطحی، رطوبت لازم خاک برای کشاورزی، رشد محصولات و ... است. بنابراین در این پژوهش به انتخاب شاخص خشکسالی مناسب بر اساس

وضعیت آب‌های زیرزمینی پرداخته شده است. بررسی پژوهش‌های مختلف (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳، سرانو و مورنو، ۲۰۰۵، دو، ۲۰۰۵ و فیوریلو و گوداگنو، ۲۰۱۰) نشان داد که شاخص بارش استاندارد، شاخصی با قابلیت انعکاس وضعیت منابع آب است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی هماهنگی مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد با وضعیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد-اردکان پرداخته شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند شاخص خشکسالی مناسب برای پایش خشکسالی با توجه به وضعیت آب‌های زیرزمینی را در دشت یزد-اردکان ارائه کند.

## مواد و روش‌ها

برای انتخاب شاخص خشکسالی مناسب در دشت یزد-اردکان، سه ایستگاه باران‌سنجی در دشت یزد-اردکان و پنج ایستگاه باران‌سنجی مرزی در پیرامون آن انتخاب شده است. این ایستگاه‌ها برای پوشش مناسب اقلیمی، در مناطق مختلف دشت و پیرامون آن قرار دارند و از نظر زمانی، شامل یک دوره آماری بالغ بر ۲۹ سال هستند.

پس از تعیین ایستگاه‌های منتخب، داده‌های ثبت نشده هر ایستگاه باید تکمیل شوند. روش‌های مختلفی برای تکمیل متغیرهای هواشناسی ارائه شده است. برخی از این روش‌ها با استفاده از معادلات ریاضی و دقت بالا در تخمین داده‌های مفقود شده، عمل می‌کند. یکی از این روش‌ها، روش EM الگوریتم Expectation Maximization (Algorithm) است (آرچارد و وودبوری، ۱۹۷۲ و دمپستر و همکاران، ۱۹۷۷). با توجه به دقت بسیار بالای این روش که در نرم‌افزار SPSS قابل انجام است، به بازسازی داده‌های ثبت نشده با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه‌های مینا اقدام شده است.

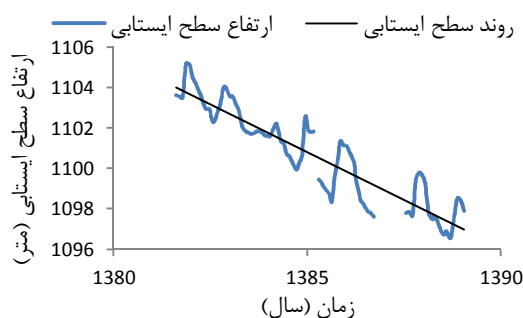
شاخص بارش استاندارد اولین بار از سوی مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) در منطقه کلرادو برای ارزیابی شدت خشکسالی معرفی شد. شاخص بارش استاندارد، یک ابزار قوی در تحلیل داده‌های بارندگی با هدف اختصاص ارزش عددی به بارندگی است که با آن می‌توان نواحی با آب و هوای به طور کامل متفاوت را با هم مقایسه کرد (نگارش و همکاران، ۱۳۸۹).

## نتایج و بحث

توزیع مکانی پیژومترها و ایستگاه‌های باران‌سنجی دشت یزد- اردکان نشان داد که پیژومترهای اشکذر، همت‌آباد و اشنیزی به ترتیب در نزدیکی ایستگاه‌های باران‌سنجی اشکذر، حسین آباد رستاق و اردکان قرار دارند. وضعیت سطح ایستابی در هر سه پیژومتر بررسی شده است که با توجه به تشابه تغییرات سطح ایستابی در این پیژومترها، فقط تغییرات سطح ایستابی و روند تغییرات آن در پیژومتر اشکذر از مهر ۱۳۸۱ تا اسفند ۱۳۸۸ در شکل ۱ ارائه شده است. بررسی‌های انجام شده با استفاده از پیژومترها بر اساس هماهنگی سری زمانی سطح ایستابی با سری زمانی شاخص بارش استاندارد به صورت نقطه‌ای است. بنابراین، برای اطمینان از صحت و درستی بررسی‌های نقطه‌ای، به هماهنگی هیدروگراف واحد دشت یزد- اردکان با میانگین وزنی مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد در سطح دشت یزد- اردکان نیز پرداخته شده است. برای تهیه هیدروگراف واحد دشت یزد- اردکان ۶۸ حلقه چاه پیژومتر و اکتشافی که به طور مستمر اندازه‌گیری ماهانه سطح ایستابی در آن‌ها انجام شده است، انتخاب و با روش چند ضلعی تیسن، مساحت هر پلیگون مشخص و ارتفاع مطلق سطح ایستابی در هر پلیگون محاسبه و هیدروگراف واحد دشت رسم شده است (شکل ۲). در شکل ۲ تغییرات ارتفاع و روند هیدروگراف واحد دشت یزد- اردکان از مهر ۱۳۸۰ تا اسفند ۱۳۸۸ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از شکل‌های ۱ و ۲ مشخص است، سطح ایستابی در پیژومترها و نیز هیدروگراف واحد دشت چندین متر افت دارد که به طور عمده می‌تواند ناشی از خشکسالی و یا برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باشد. برای تشخیص و حذف روند ناشی از افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی روش‌های مختلفی از جمله برازش منحنی وجود دارد (سامانی، ۲۰۰۱). این روش زمانی که سری زمانی روند روشنی دارد، بسیار مفید است. بررسی آمار و اطلاعات مربوط به برداشت از آب‌های زیرزمینی در این دشت، نشان‌دهنده افزایش برداشت از دشت با یک روند خطی در طول زمان است. بنابراین برای حذف این روند خطی (اثر برداشت)، از برازش منحنی با توابع خطی استفاده می‌شود. در این صورت به حذف روند سطح ایستابی در پیژومترهای اشکذر، همت‌آباد و اشنیزی و

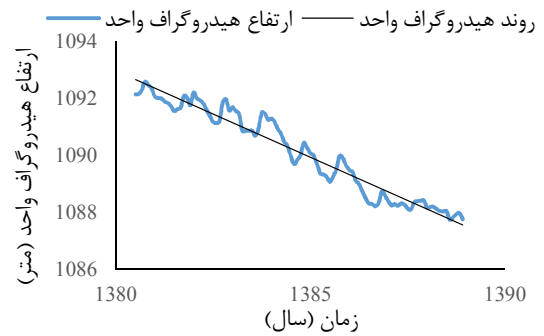
هیدروگراف واحد دشت پرداخته شده است و تغییرات سطح ایستابی در پیژومتر اشکذر و هیدروگراف واحد دشت پس از حذف روند ناشی از برداشت بی‌رویه از آبخوان دشت به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. برای ارزیابی همبستگی سطح ایستابی با مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد در سه ایستگاه اشکذر، حسین آباد رستاق و اردکان، هماهنگی سری زمانی مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد (SPI 3, SPI 6, SPI 9, SPI 12, SPI 18, SPI 24, SPI 48) با سری زمانی تغییرات سطح ایستابی (پس از حذف روند) بررسی شده است که نتایج آن برای ایستگاه اشکذر در شکل ۵ ارائه شده است و برای ایستگاه‌های حسین آباد رستاق و اردکان نیز نتایج مشابهی حاصل شده است. این نتایج ارتباط بین سطح ایستابی و بارش تجمعی ماه‌های گذشته را در بررسی نقطه‌ای نشان می‌دهد. همچنین برای ارزیابی همبستگی سطح ایستابی با مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد در تمام نقاط دشت، هماهنگی سری زمانی میانگین وزنی مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد در سطح دشت با سری زمانی ارتفاع هیدروگراف واحد دشت (پس از حذف روند) بررسی شده است که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. این نتایج ارتباط بین برآیند سطح ایستابی و برآیند بارش تجمعی ماه‌های گذشته را در تمام نقاط دشت نشان می‌دهد. برآیند بارش تجمعی ماه‌های گذشته در سطح دشت برگرفته از میانگین وزنی مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد در سطح دشت است که برای تهیه آن از سه ایستگاه باران‌سنجی در سطح دشت و پنج ایستگاه باران‌سنجی مرزی در پیرامون دشت و روش چند ضلعی تیسن، استفاده شده است.



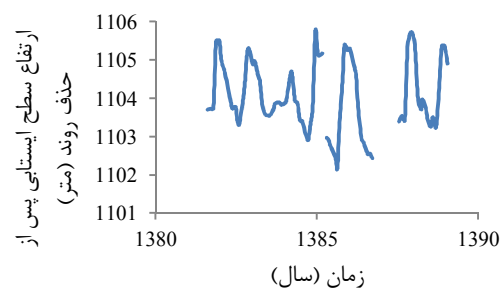
شکل ۱- تغییرات سطح ایستابی و روند تغییرات آن در پیژومتر اشکذر دشت یزد- اردکان

SPI 12 است که با توجه به پژوهش‌های فیوریلو و گوداگنو (۲۰۱۰) به عنوان شاخص خشکسالی مناسب انتخاب می‌شود. همچنین SPI 24 و SPI 48 از نظر ضریب همبستگی پس از SPI 12 قرار می‌گیرند، ولی با توجه به پژوهش‌های گاتمن (۱۹۹۹) و سرانو و مورنو (۲۰۰۵) ممکن است در کمیت بخشی به خشکسالی مؤثر نباشند. همچنین بهترین هماهنگی برای هیدروگراف واحد دشت یزد- اردکان با میانگین وزنی شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه (SPI 12) در سطح دشت رخ می‌دهد و نیز تغییرات ضریب همبستگی هیدروگراف واحد دشت با مقیاس زمانی شاخص بارش استاندارد (شکل ۶)، مشابه شکل ۵ است. بنابراین، بررسی‌های انجام شده با هیدروگراف واحد دشت که برای پایداری از سطح ایستابی در نقاط مختلف دشت است، نتایج مربوط به انتخاب شاخص خشکسالی مناسب را تأیید می‌کند. اما ضریب همبستگی حاصل شده با استفاده از هیدروگراف واحد دشت، کمتر از ضریب همبستگی حاصل شده با استفاده از پیژومتر منفرد است، زیرا خطای ضریب همبستگی حاصل شده با استفاده از هیدروگراف واحد دشت، ناشی از پیروی شاخص بارش استاندارد از توزیع نرمال، توزیع مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی و کم بودن تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی است، در حالی که خطای ضریب همبستگی حاصل شده با استفاده از پیژومتر منفرد، فقط ناشی از پیروی شاخص بارش استاندارد از توزیع نرمال است.

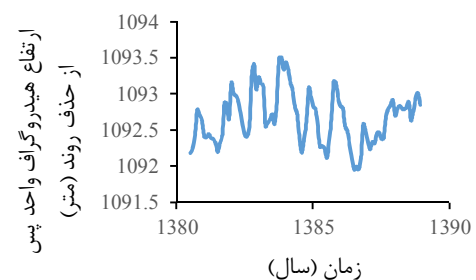
شکل ۷ سری زمانی تغییرات سطح ایستابی پس از حذف روند و مقدار SPI 12 را در ایستگاه اشکذر از مهر ۱۳۸۱ تا اسفند ۱۳۸۸ نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص شده است، زمانی که SPI 12 منفی می‌شود، سطح ایستابی پایین می‌افتد. به عبارت دیگر زمانی که SPI 12 منفی می‌شود، مقدار سطح ایستابی (پس از حذف روند) کمتر از مقدار میانگین این سطح (پس از حذف روند) است. علاوه بر این در شکل ۸ سری زمانی تغییرات هیدروگراف واحد دشت پس از حذف روند و برآیند SPI 12 در سطح دشت از مهر ۱۳۸۰ تا اسفند ۱۳۸۸ ارائه شده است که نه تنها هماهنگی تغییرات سطح ایستابی پس از حذف روند با مقدار SPI 12 را در ایستگاه‌های اشکذر، حسین‌آباد رستاق و اردکان تأیید می‌کند، بلکه این هماهنگی را مربوط به تمام دشت می‌داند.



شکل ۲- تغییرات ارتفاع و روند هیدروگراف واحد دشت یزد- اردکان

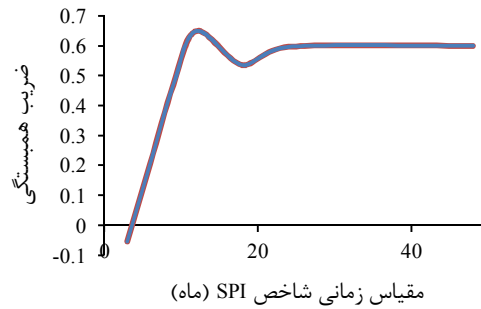


شکل ۳- تغییرات سطح ایستابی پس از حذف روند در پیژومتر اشکذر دشت یزد- اردکان

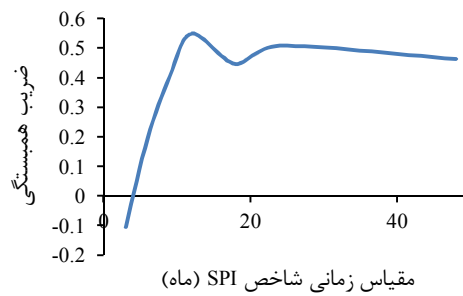


شکل ۴- تغییرات هیدروگراف واحد پس از حذف روند در دشت یزد- اردکان

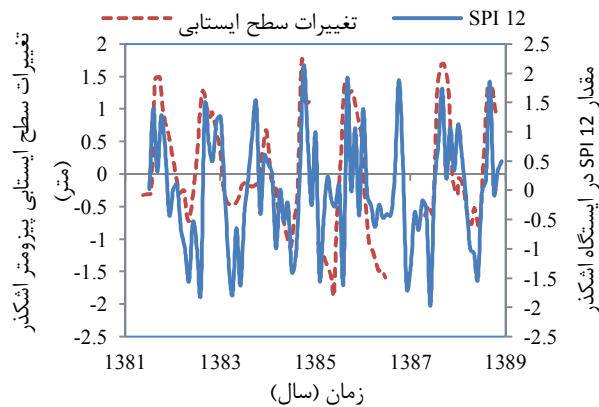
برای پیژومترهای اشکذر، همت‌آباد و اشنیزی بهترین هماهنگی با شاخص بارش استاندارد در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (SPI 12) رخ می‌دهد که نشان می‌دهد، بارش تجمعی ۱۲ ماه گذشته به شدت تغذیه آبخوان را در این نقاط کنترل می‌کند، اما تا ۴۸ ماه هماهنگی خوبی دارد که نقش بارش سال‌های گذشته را در تراز سطح ایستابی نشان می‌دهد. همچنین تطابق SPI 3 و SPI 6 ضعیف است که نشان می‌دهد، این بازه‌های زمانی نمی‌توانند خشکسالی آب‌های زیرزمینی را کنترل کنند (نسیمی، ۱۳۹۰). از این رو، بالاترین ضریب همبستگی مربوط به



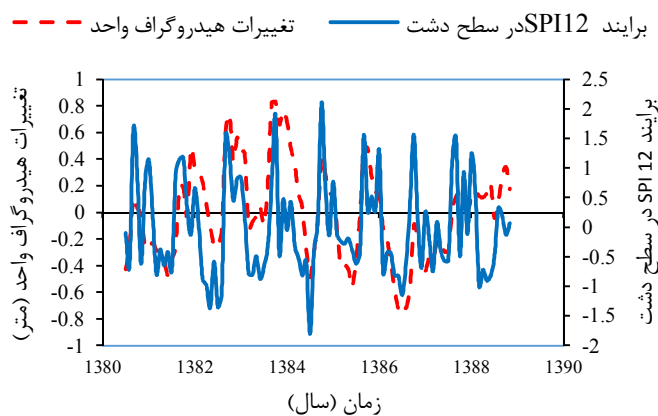
شکل ۵- نتایج تطابق سری زمانی سطح ایستابی با سری زمانی مقیاس‌های زمانی مختلف SPI در ایستگاه اشکذر



شکل ۶- نتایج تطابق سری زمانی هیدروگراف واحد با سری زمانی میانگین وزنی مقیاس‌های زمانی مختلف SPI در دشت یزد- اردکان



شکل ۷- سری زمانی تغییرات سطح ایستابی پس از حذف روند و تغییرات SPI 12 در ایستگاه اشکذر



شکل ۸- سری زمانی تغییرات هیدروگراف واحد پس از حذف روند و تغییرات برایند SPI 12 در سطح دشت

## نتیجه‌گیری

شاخص بارش استاندارد، نشان‌دهنده انحراف بارش از میانگین بلندمدت آن برای مقیاس‌های زمانی مختلف و انعکاس دوره‌های کم بارش (SPI منفی) و دوره‌های با بارش کافی (SPI مثبت) است. شرایط هیدرولوژیکی با نزول یا صعود سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش یا افزایش دبی چشمه‌ها خود را در آبخوان نشان می‌دهد. به عبارت دیگر هماهنگی بین مقیاس شاخص بارش استاندارد و سطح ایستابی را رفتار آبخوان تعیین می‌کند، زیرا رابطه بین بارش و سطح ایستابی را ایجاد می‌کند.

بهترین هماهنگی بین شاخص بارش استاندارد و سطح ایستابی برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه است که نشان می‌دهد، بارش تجمعی ۱۲ ماه گذشته به شدت تغذیه آبخوان را کنترل می‌کند، اما تا ۴۸ ماه هماهنگی خوبی دارد که نقش بارش سال‌های گذشته را در تراز سطح ایستابی نشان می‌دهد. همچنین تطابق SPI 3 و SPI 6 ضعیف است که نشان می‌دهد، این بازه‌های زمانی نمی‌توانند خشکسالی آب‌های زیرزمینی را کنترل کنند. علاوه بر این زمانی که SPI 12 منفی می‌شود، سطح ایستابی پایین می‌افتد که می‌تواند برای پیش‌بینی خشکسالی آب‌های زیرزمینی که برای مدیریت منابع آب مهم است، استفاده شود.

بر اساس شاخص بدون بعد SPI می‌توان به سادگی دیدی کلی نسبت به وضعیت خشکسالی منطقه پیدا کرد و به یک شناخت کلی از وضعیت هیدرولوژیکی آبخوان‌های مجاور بدون تحلیل اطلاعات آب‌های زیرزمینی دست یافت.

هر یک از شاخص‌های خشکسالی در منطقه خاصی ارائه شده است و ممکن است با منطقه مورد مطالعه در تحقیقات از نظر شرایط اقلیمی و هیدروژئولوژیکی یکسان نباشد، بنابراین توصیه می‌شود قبل از به‌کارگیری شاخص مورد نظر، شاخص خشکسالی مناسب در منطقه انتخاب شود تا نتایج حاصل از پایش خشکسالی با دقت بیشتری انجام شود و بتواند برای پیش‌بینی و در نهایت اعمال مدیریت ریسک استفاده شود.

## منابع

۱. انصافی‌مقدم ط. ۱۳۸۶. ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در

- حوضه دریاچه نمک. فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۱۴(۲): ۲۷۱-۲۸۸.
۲. شمس‌نیا س.ر. پیرمردیان ن. و بوستانی ف. ۱۳۸۸. مقایسه طبقه‌بندی‌های مختلف شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و بومی‌سازی آن جهت ارزیابی خشکسالی در استان فارس. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
۳. کاظمی آ. سبزی‌پرور ع.ا. معروفی ص. بذرافشان ج. و غفوری م. ۱۳۸۷الف. مطالعه ۶ نمایه خشکسالی هواشناسی به روش آماری بر مبنای سال آبی. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. تهران.
۴. کاظمی آ. سبزی‌پرور ع.ا. معروفی ص. بذرافشان ج. و غفوری م. ۱۳۸۷ب. مقایسه تطبیقی ۷ نمایه خشکسالی هواشناسی به روش تحلیل خوشه‌ای تحت شرایط اقلیمی نیمه‌خشک. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران. تهران.
۵. نسیمی ع. ۱۳۹۰. ارزیابی شاخص‌های خشکسالی و بررسی تطابق شدت خشکسالی با وضعیت منابع آب زیرزمینی در استان یزد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی- آبشناسی. دانشکده علوم. دانشگاه شیراز. ۱۸۵ صفحه.
۶. نگارش ح. خسروی م. شاه‌حسینی م. و محمودی پ. ۱۳۸۹. مطالعه خشکسالی‌های کوتاه‌مدت شهرستان زاهدان. فصلنامه جغرافیا و توسعه. ۸(۲): ۱۰۹-۱۳۴.
7. Dempster A.P. Laird N.M. and Robin D.B. 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological) 39(1): 1-38.
8. Do A. 2005. Regional drought analysis and mitigation using the SPI. ICID 21st European Regional Conference. Frankfurt (Order) and Slubice. Germany and Poland.
9. Fiorillo F. and Guadagno F.M. 2010. Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. Water Resour Manage 24:1867-1884.
10. Guttman N.B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. Journal of American Water Resources Association 35(2): 311-322.
11. Mckee T.B. Doesken N.J. and kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, Conference on Applied Climatology, 8th Annual Session Proceedings. 170-184.
12. Orchard I. and Woodbury M.A. 1972. A

missing information principle: theory and applications, Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 6th Annual Session Proceedings . 697-715.

13. Samani N. 2001. Response of karst aquifers to rainfall and evaporation, Maharlu basin, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies* 63(1): 33-40
14. Vicente-Serrano S.M. and López-Moreno J.I. 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: An Evaluation of the Standardized Precipitation Index in a Mountainous Mediterranean Basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9: 523-533.

