

ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI با استفاده از شاخص بارش استاندارد اصلاح شده MSPI به منظور پایش و پهنه‌بندی خشکسالی

برات مجردی^{۱*}، جواد میرمیری^۲ و حسین علیزاده^۳

^۱ استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران و
^۲ استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۵

چکیده

مدیریت خشکسالی به منظور بهره‌برداری از منابع آب بسیار ضروری است. در این مطالعه، برای پایش خشکسالی، از آمار بارندگی ماهانه مربوط به ۳۵ ایستگاه سینوپتیک استان قزوین طی دوره‌های آماری ۳۰ ساله استفاده شد. در این پژوهش، دو شاخص خشکسالی شامل شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (MSPI) و شاخص بارش استاندارد (SPI) محاسبه و با چهار شاخص دیگر محاسبه شده در پژوهش‌های قبل در این منطقه، مقایسه شد. نتایج برای پایش خشکسالی نشان داد که دقت شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (MSPI) از شاخص بارش استاندارد (SPI) و دیگر شاخص‌ها بیشتر است. بعد از مشخص شدن وضعیت خشکسالی در ایستگاه‌ها، با استفاده از روش‌های نظیر IDW، Kriging و RBF درون‌یابی و پهنه‌بندی منطقه صورت گرفت. با توجه به مقدار میانگین خطا، نتایج از عملکرد بهتر روش IDW با توان یک حکایت دارد. علاوه بر این، برای پهنه‌بندی خشکسالی از رویکرد دیگری استفاده شد. به این صورت که ابتدا، مقدار بارش ماهانه درون حوضه را با روش Kriging درون‌یابی شد، سپس، مقدار MSPI بارش ماهانه برای هر سلول به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که اگر ابتدا مقدار بارش ماهانه را پهنه‌بندی و سپس، مقدار MSPI برای هر سلول محاسبه شود، نسبت به روشی که ابتدا شاخص خشکسالی ایستگاه‌ها محاسبه و سپس، پهنه‌بندی شود، از دقت بیشتری برخوردار است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) با استفاده از محصول ماهانه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) سنجنده MODIS محاسبه شد. همبستگی بین MSPI و VCI نشان می‌دهد، شاخص MSPI تا حدود زیادی نتایج شاخص VCI را تایید می‌کند. پس، می‌توان نتیجه گرفت، در صورت فقدان یا کمبود ایستگاه باران‌سنجی از شاخص VCI مبتنی بر سنجش از دور ماهواره-ای با صحت قابل قبولی می‌توان استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه سینوپتیک، درون‌یابی، سنجش از دور، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، شاخص خشکسالی

مقدمه

چه به صورت مستقیم و چه غیرمستقیم اثرات مخربی به بار می‌آورد. با توجه به کمبود بارش در ایران نسبت به میانگین جهانی، خشکسالی همواره موضوعی چالش برانگیز در مدیریت منابع آب ایران بوده است. برای

از میان بلایای طبیعی، خشکسالی به گونه‌ای متفاوت از بقیه است. خشکسالی در زمینه‌های مختلف

* مسؤل مکاتبات: mojaradi@iust.ac.ir

مکانی، از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود که برای محاسبه آن‌ها وجود داده‌های مناسب و طولانی مدت پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی بسیار ضروری است.

شاخص‌های خشکسالی اطلاعات مختلف مربوط به بارش، جریان و یا متغیرهای اقلیمی دیگر را به‌طور خلاصه به‌صورت یک تصویر واضح از شرایط رطوبتی هوا یا خاک در اختیار می‌گذارند (Heim, 2002). هر کدام از این شاخص‌ها، دارای نقاط قوت و ضعف به‌خصوصی هستند. یکی از مهمترین شاخص‌ها، عبارت است از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) که به‌وسیله McKee (1993) برای بررسی خشکسالی‌های هواشناختی معرفی شده است. طبیعت احتمالاتی SPI، این امکان را فراهم می‌کند که بتوان دوره‌های خشکی و مشخصه‌های آن را در ایستگاه‌های مختلف مقایسه کرد و این مشخصه‌ها را برحسب دوره‌های بازگشت تفسیر کرد. این شاخص، به‌طور گسترده به‌وسیله محققان مختلف برای تحلیل خشکسالی‌ها در نواحی مختلف جهان به‌کار رفته است (Moreira و همکاران، 2008؛ Cancelliere و همکاران، 2007؛ Hayes و همکاران، 1999؛ Abolverdi و همکاران، 2020؛ Mirabbasi و همکاران، 2013). Ensafi Moghadam (2007) برای ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک، با استفاده از آمار 44 ساله 34 ایستگاه هواشناسی حوضه دریاچه نمک، نشان داد که شاخص دهک‌ها (DI) و شاخص (SPI) مقارن با سال وقوع کمینه بارندگی، رخداد خشکسالی شدید و بسیار شدید را در تمام ایستگاه‌های تحت مطالعه نشان داده، کارایی بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها از جنبه نمایش خشکسالی بسیار شدید دارند. بنابراین، در انتخاب مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی در طی سال‌های یک دوره طولانی مدت، شاخص SPI و شاخص دهک‌ها در جایگاه نخست، شاخص ZSI در جایگاه دوم، شاخص درصد نرمال در جایگاه سوم قرار می‌گیرد. Karimi و همکاران (2013) برای بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک مازندران شاخص بارش استاندارد (SPI) شاخص درصد نرمال (PNI)، شاخص دهک‌ها (DI)،

خشکسالی تعاریف متعددی مطرح شده که به‌طور کلی، خشکسالی، به کمبود رطوبت مستمر و غیر طبیعی اطلاق می‌شود (Palmer, 1968). این پدیده، یکی از بلاهای طبیعی پرهزینه و کمتر شناخته شده می‌باشد که بیش از هر بلای طبیعی دیگر خسارات کشاورزی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی به همراه دارد (Wilhite, 2000). خشکسالی از دیرباز اثرات نامطلوبی به همراه داشته است. تغییرات شدید بارش از لحاظ مقدار، شدت و پراکندگی مکانی یا زمانی باعث شده است که خشکسالی هر چند سال یکبار در منطقه‌ای حادث و باعث خسارات زیادی در ابعاد مختلف شود. البته شدت و مدت خشکسالی‌ها در اقلیم‌های مختلف به‌طور چشم‌گیری متفاوت است (Wilhite, 1993). در دهه‌های اخیر وقوع خشکسالی‌های محیطی به‌خاطر مداخله عامل انسانی بیش از گذشته بوده است (Moradi و همکاران، 2011). وقوع خشکسالی از ویژگی‌های اصلی آب‌های خشک و نیمه‌خشک ایران است که دائمی نیست (Barua, 2011). برای مثال، خشکسالی سال‌های 1377-1378 لغایت 1380-1379 که یکی از وخیم‌ترین خشکسالی‌های ثبت‌شده در ایران است، حدود نصف جمعیت کشور را تحت تاثیر قرار داد و خسارات وارده به بخش کشاورزی و دام حدود 2/5 میلیارد دلار برآورده شده است (Agrawala و همکاران، 2001؛ Morid, 2004). ارزیابی صحیح وقوع خشکسالی‌ها می‌تواند اطلاعات با ارزشی در اختیار مدیران و سیاست‌گذاران بخش آب کشور گذاشته، آن‌ها را قادر می‌سازد تا تدابیری مناسب برای مقابله و کاهش عواقب مخرب این پدیده اتخاذ کنند. پیچیدگی عوامل ایجاد خشکسالی‌ها، یکی از دلایل اصلی است که باعث شده مدیران و سیاست‌گذاران بخش آب قادر به ارزیابی دقیق خشکسالی‌ها نباشند. بنابراین، محققان برای ارزیابی خشکسالی‌ها و تصمیم‌گیری برای مقابله با اثرات آن، در اغلب موارد بر شاخص‌های آماری تکیه می‌کنند.

یکی از روش‌های مطالعات خشکسالی، تحلیل داده‌های بارندگی است که از عمومی‌ترین روش‌ها به شمار می‌رود. برای بیان کمی و پدیده خشکسالی و همچنین، ارزیابی آن در مقیاس‌های مختلف زمانی و

بلافاصله رویداد خشکسالی دوم اتفاق افتاده است. برای حل کردن محدودیت‌های فوق‌الذکر، شاخص SPI اصلاح شده را می‌توان پیشنهاد کرد. این شاخص به‌وسیله Kao و Govindaraju (۲۰۱۰) پیشنهاد شد. برخلاف SPI متداول که میانگین کلی (از ابتدای دوره آماری تا انتهای آن) را برای تفکیک دوره‌های تر و خشک در نظر می‌گیرد، در شاخص SPI اصلاح شده، حد آستانه بر اساس میانگین ماهانه است و همچنین، SPI اصلاح شده حاوی مفاهیم آماری بهتری می‌باشد (Mirabbasi و همکاران، ۲۰۱۳).

یکی از بهترین روش‌های تحلیل داده‌های مکانی، درون‌یابی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از زمین‌آمار می‌باشد (Kao و Govindaraju، ۲۰۱۰). طی چند دهه اخیر، مبانی علم زمین‌آمار به‌خوبی گسترش یافته است و توانایی‌های این شاخه از آمار در بررسی و پیش‌بینی متغیرهای مکانی مشخص شده است (Misaghi و Mohammadi، ۲۰۰۶). از آن‌جا که آمار کلاسیک قادر به در نظر گرفتن توزیع مکانی پارامترها نبوده، لذا زمین‌آمار به‌عنوان تکنیکی برای این هدف استفاده می‌شود (Madani، ۱۹۹۴). با روش زمین‌آمار در ایران، Ghahroudi Tali (۲۰۰۲) در ارتباط با تهیه نقشه‌های مکانی بارش و خشکسالی به ارزیابی درون‌یابی به روش کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله در استان کرمان پرداخت. نتایج نشان داد که کریجینگ وابستگی زیادی به تعداد نقطه نمونه‌برداری و فاصله آن‌ها از یکدیگر دارد. Saghafian و همکاران (۲۰۰۵)، قابلیت چند روش درون‌یابی از جمله میانگین متحرک وزنی و کریجینگ را برای برآورد توزیع مکانی بارندگی ماهانه و سالانه جنوب غربی ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ تغییرات مکانی بارندگی در منطقه را بهتر نشان داده و با توپوگرافی منطقه هماهنگی بیشتری دارد. Rezaeiavid و Mesgari (۲۰۰۵) انواع مختلف روش‌های درون‌یابی بر روی داده‌های بارش در محدوده ایستگاه‌های اندازه‌گیری باران در استان خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بهترین روش برای درون‌یابی، روش کریجینگ ساده بوده است و استفاده از روش کوکریجینگ و DEM در زمانی که با کمبود پراکنش ایستگاه‌های

شاخص Z چینی (CZI)، شاخص Z چینی اصلاح شده (MCZI) شاخص عدد Z (ZSI) و روش موهان و رانگاچاریا را مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شاخص‌های درصد نرمال و دهک‌ها در تمام ایستگاه‌ها روند مشابهی دارند و همچنین، منحنی‌های مربوط به شاخص‌های SPI، ZSI و CZI در تمام ایستگاه‌ها تقریباً برهم منطبق بوده، همبستگی بسیار خوبی به‌صورت دو به دو بین آن‌ها مشاهده می‌شود که برای شاخص MCZI این‌گونه نبوده است. Saunders و Lioyd-Hughes (۲۰۰۲) با مقایسه شاخص SPI با شاخص PDSI^۱ در اروپا نشان دادند که بین این دو شاخص، در مقیاس نه و ۱۲ ماهه هماهنگی وجود دارد. همچنین، روندهای دو شاخص نشان داد که در قرن بیستم مساحتی از اروپا که شرایط خشکسالی شدید و متوسط را تجربه می‌کند، تغییر ناچیزی کرده است.

گرچه شاخص SPI به‌طور گسترده به‌عنوان یک ابزار عمومی رایج برای ارزیابی خشکسالی پذیرفته شده است، ولی دارای محدودیت‌هایی است. اول این‌که، شاخص SPI تغییرپذیری فصلی بارش را نمی‌تواند توصیف کند. به‌عبارت دیگر، زمانی که فصل خشک با فصل مرطوب مقایسه می‌شود، یک مقدار معین بارش باید اثر متفاوتی داشته باشد. ولی با توجه به این‌که شاخص SPI بر اساس میانگین کلی بارش بیان می‌شود، مقدار آن برای ماه‌ها و فصل‌های مختلف معنای یکسانی دارد که این با واقعیت مطابقت ندارد (Kao و Govindaraju، ۲۰۱۰). دومین محدودیت در استفاده از SPI برای ارزیابی خشکسالی‌ها، تعیین طول دوره‌های خشکسالی است. این مسئله، به‌ویژه در مواردی که یک دوره ترسالی کوتاه‌مدت مابین دو دوره خشکی با مدت و شدت بزرگ قرار می‌گیرد، نمود پیدا می‌کند. در این حالت، بر اساس SPI، دو رویداد خشکسالی مجزا روی داده است، در حالی که واقعیت این است که در منطقه مورد مطالعه یک رویداد خشکسالی بلندمدت رخ داده است، زیرا مقدار بارش‌ها در دوره ترسالی کمتر از آن بوده که بتواند کمبود ایجاد شده به‌وسیله خشکسالی اول را جبران کند و

^۱ Palmer Drought Severity Index

صفر و واریانس یک) انتقال می‌یابند. مقدار Z قرائت شده، همان مقدار شاخص است. مقادیر مثبت شاخص نشان‌دهنده بارندگی‌های بیش از میانه و مقادیر منفی بارندگی زیر میانه را نشان می‌دهند. طبقات این شاخص به شرح ذیل می‌باشد.

مطالعات Thom در سال ۱۹۶۶ نشان می‌دهد که داده‌های بارندگی از توزیع گاما تبعیت می‌کنند، این توزیع به صورت تابع چگالی احتمال زیر بیان می‌شود.

$$g(x) = \frac{1}{B^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/B} \quad \text{برای } X > 0 \quad (1)$$

که در آن، α پارامتر نمودار، β پارامتر مقیاس و X مقدار بارندگی می‌باشند.

بارندگی وجود دارد، مفید است. Faraji Sabokbar و Azizi (۲۰۰۶)، میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی مختلفی مثل تین، معکوس وزنی فاصله، اسپلاین و انواع کریجینگ را برای الگوسازی بارندگی حوضه کارده مشهد، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که روش‌های تین و کریجینگ عملکرد بهتری داشتند.

مواد و روش‌ها

در روش شاخص بارندگی استاندارد شده، ابتدا داده‌های ثبت شده در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی (معمولاً ۳۰ ساله)، با توزیع آماری گاما برازش داده شده، سپس، به توزیع نرمال استاندارد (با میانگین

جدول ۱- مقادیر مختلف شاخص SPI

SPI	وضعیت خشکسالی
+۲ و بیشتر	تر سالی خیلی شدید
۲ تا ۱/۵	تر سالی شدید
۱/۵ تا ۱	تر سالی متوسط
۱ تا -۱	نزدیک به شرایط عادی
-۱/۵ تا -۱	خشکسالی متوسط
-۲ تا -۱/۵	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	خشکسالی بسیار شدید

که در آن‌ها، $\hat{\alpha}$ مقدار بهینه α ، $\hat{\beta}$ مقدار بهینه β ، x مقدار بارندگی، \bar{X} میانگین بارندگی و n تعداد داده‌های مربوط به بارندگی می‌باشد. با داشتن مقادیر $\hat{\alpha}$ و $\hat{\beta}$ تابع احتمال تجمعی بارندگی برای هر سری زمانی معین در ماه و ایستگاه مورد نظر به دست می‌آید، این تابع به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (6)$$

با قرار دادن $t = x / \hat{\beta}$ باشد، معادله بالا به صورت تابع گامای ناقص در خواهد آمد.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

از آنجا که تابع گاما برای مقادیر صفر تعریف نشده و توزیع بارندگی ممکن است، دارای مقادیر صفر نیز باشد، تابع تجمعی احتمال با در نظر گرفتن مقادیر صفر به صورت زیر در می‌آید.

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (8)$$

$$q = m/n \quad (9)$$

$\Gamma(\alpha)$ تابع گاما بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

در روش شاخص بارندگی استاندارد شده توزیع فراوانی بارندگی در هر ایستگاه به توزیع گاما برازش داده شده، مقادیر α و β برای هر ایستگاه در هر مقیاس زمانی و برای هر ماه از سال برآورد می‌شود. برای برآورد بهینه مقادیر α و β از معادلات زیر که در سال ۱۹۶۶ به وسیله Thom ارایه شد، استفاده می‌شود. اساس این معادلات روش درست‌نمایی بشینه می‌باشد.

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (3)$$

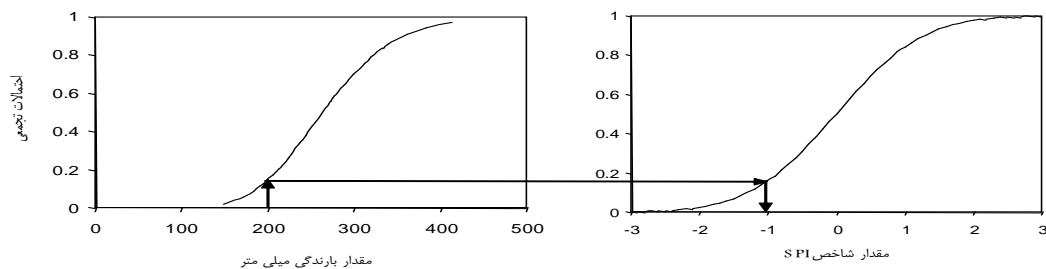
$$\hat{\beta} = \frac{\bar{X}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

$$A = Ln(\bar{x}) - \frac{\sum Ln(x)}{n} \quad (5)$$

احتمال تجمعی گاما بر داده‌های بارندگی سالانه می‌باشد. منحنی سمت راست در شکل ۱، حاکی از تابع احتمال تجمعی متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z است. محور طول‌ها در نمودار سمت راست، متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z (یا مقدار SPI) را نشان می‌دهد. بنابراین، از این نمودار می‌توان در سطوح احتمال مشخص، مقدار SPI را با مقیاس سالانه استخراج کرد. برای مثال، به منظور یافتن مقدار SPI مربوط به ۲۰۰ میلی‌متر بارندگی، از نقطه مورد نظر روی محور طول‌ها (نمودار سمت چپ) خطی بر محور X ‌ها عمود می‌شود تا منحنی توزیع احتمال تجمعی گاما را قطع کند. سپس، در همان سطح احتمال تجمعی، خطی افقی اخراج کرده تا منحنی نمودار سمت راست را قطع کند. در مرحله بعد از این، نقطه خطی به طرف محور X ‌ها عمود کرده تا آن را در نقطه‌ای روی این محور قطع کند. محل تقاطع، مقدار SPI است که در این مورد مقدار SPI تقریباً ۱- است.

که در آن، q احتمال صفر بودن مقدار بارندگی و m تعداد داده‌های بارندگی در سری زمانی با مقدار صفر می‌باشد.

Thom (۱۹۶۶)، از جدول تابع گامای ناقص برای تعیین احتمالات تجمعی $G(x)$ استفاده کرد. پس از محاسبه تابع تجمعی کل، $H(x)$ تغییر نمودار هم احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z یا (SPI) با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد. توجه به شکل ۱، درک راحت‌تر این موضوع را امکان‌پذیر می‌سازد. در این شکل، چگونگی تبدیل مقدار بارندگی سالانه به مقدار SPI معادل آن با میانگین صفر و واریانس یک تصویر شده است. در شکل ۱ (سمت چپ)، محور طول‌ها مقادیر واقعی بارندگی سالانه یک ایستگاه را طی دوره آماری نشان می‌دهد و محور عرض‌ها حاکی از احتمالات تجمعی مقادیر بارندگی برای دوره آماری مورد نظر است. منحنی سمت چپ در شکل ۱، حاصل برازش تابع



شکل ۱- مقدار بارش با مقدار نظیر آن با شاخص SPI

۲. تشکیل سری‌های زمانی X_w^{month} در مقیاس w ماهه ($w = 1, \dots, 6, \dots, 12$) برای هر ماه سال (ژانویه، فوریه، ...، month=...)
۳. برازش توزیع آماری گاما بر هر سری X_w^{month} و تخمین پارامترهای α و β برای هر ماه سال
۴. محاسبه احتمالات تجمعی توزیع گاما برای هر ماه سال
۵. تبدیل هم احتمال توزیع تجمعی گاما به نرمال
۶. استخراج متغیر تصادفی Z_w^{month} یا SPI_w^{month} مربوط به هر مقدار بارندگی در سطوح هم احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال

- شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (MSPI):
 برای حل کردن برخی از محدودیت‌های SPI، Kao و Govindaraju (۲۰۱۰) شاخص اصلاح شده را پیشنهاد کردند. برخلاف SPI متداول که میانگین کلی (از ابتدای دوره آماری تا انتهای آن) را برای تفکیک دوره‌های تر و خشک در نظر می‌گیرد، در شاخص SPI اصلاح شده، حد آستانه بر اساس میانگین ماهانه است و همچنین، SPI اصلاح شده حاوی مفاهیم آماری بهتری می‌باشد (Mirabbasi و همکاران، ۲۰۱۳).
 محاسبه شاخص SPI اصلاح شده شامل:
 ۱. استخراج داده‌های بارندگی ماهانه

شدید یا شدیدی است که در منطقه تحت بررسی اتفاق افتاده است. طبق این فرضیه، در ابتدا کمینه مقادیر بارندگی در طول دوره مشترک آماری استخراج و به وسیله شاخص‌های خشکسالی نظیر شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (MSPI)، شاخص دهک (DI)، شاخص Z چینی (CZI)، شاخص Z چینی اصلاح شده (MCZI) و شاخص Z-Score (ZSI) برای پنج ایستگاه ارزیابی شد. جدول ۲، کمینه مقادیر بارندگی و سال وقوع آن را به همراه پایش وضعیت جوی از دیدگاه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی نشان می‌دهد (در این جدول به جای استفاده از عدد برای بیان وضعیت خشکسالی از توصیف کیفی استفاده شده است).

$$SPI_w^{mod} = \varphi^{-1}(u_w^{month}) = \varphi^{-1}\left(F_{X_w^{month}}(x_w^{month})\right) \quad (10)$$

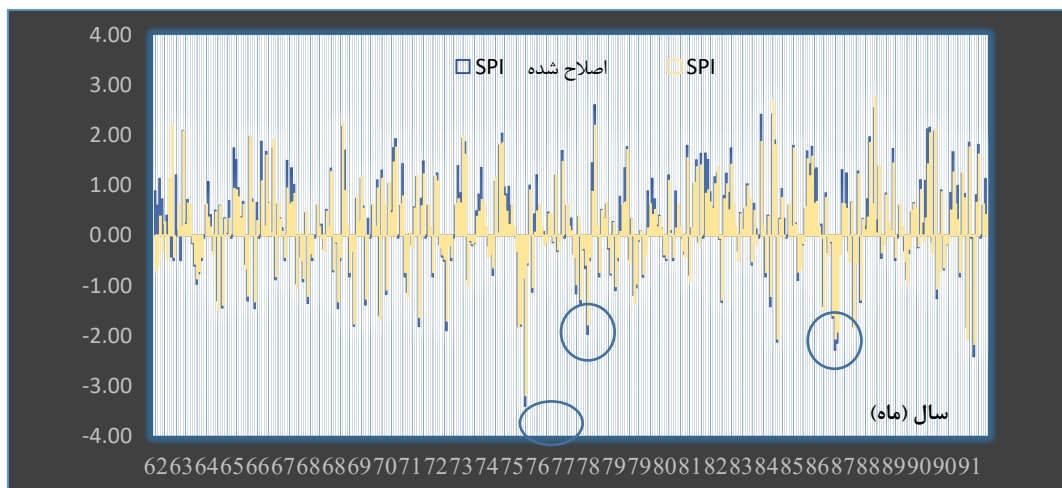
۷. مرتب کردن SPI_w^{month} به ترتیب زمانی و تشکیل سری زمانی SPI_w^{month} ها

۸. تعیین وضعیت خشکسالی‌های منطقه با این شاخص

ابتدا وضعیت خشکسالی ایستگاه‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف در مقیاس سالانه انجام شد. به منظور انتخاب بهترین شاخص توصیف‌گر، از یک فرضیه به عنوان سنجه کارآمد برای پایش خشکسالی استفاده شد (Khalili و Bazrafshan, ۲۰۰۲). در این فرضیه کمینه مقدار بارندگی طی یک دوره بلندمدت اقلیمی منعکس کننده خشکسالی هواشناسی بسیار

جدول ۲- کمینه مقادیر بارندگی و سال وقوع آن را به همراه پایش وضعیت جوی

نام ایستگاه	کمینه بارش	سال وقوع	MSPI	SPI	MCZI	ZSI	DI	CZI
قزوین	۱۴۷/۳۰	۱۳۸۷-۱۳۸۶	خشک شدید	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک شدید
معلم کلايه	۲۰۶/۹۰	۱۳۸۷-۱۳۸۶	خشک شدید	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک شدید
آوج	۲۳۶	۱۳۸۷-۱۳۸۶	خشک شدید	خشک شدید	خشک شدید	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک ضعیف
بویین زهرا	۱۰۶/۳۰	۱۳۸۷-۱۳۸۶	خشک شدید	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک ضعیف	نزدیک نرمال	خشک ضعیف
تاکستان	۱۲۰	۱۳۸۷-۱۳۸۶	خشک شدید	خشک شدید	نزدیک نرمال	خشک ضعیف	نزدیک نرمال	خشک ضعیف
تعداد خشکسالی شدید			۵	۵	۱	۳	۰	۲



شکل ۲- مقایسه دو شاخص SPI و SPI اصلاح شده با بارندگی ماه متناظر

می‌رود که درون‌یابی یا واسطه‌یابی نام دارد. درون‌یابی، یک نوع تحلیل ریاضی-آماري است که با استفاده از آن می‌توان برای نقاطی که هیچ‌گونه برداشت اطلاعاتی انجام نشده، مقادیری را برآورد کرد. در این‌جا، درون‌یابی و پهنه‌بندی منطقه را با استفاده از روش‌هایی نظیر IDW، Kriging و GPI RBF صورت گرفت. سپس، میانگین خطای هر یک از روش‌های فوق محاسبه شد.

به کمک شاخص‌های خشکسالی می‌توان میزان خشکسالی را در مقیاس زمانی بررسی کرد، ولی اطلاعات نقطه‌ای این شاخص‌ها در ایستگاه‌ها برای بررسی گسترش جغرافیایی و تعیین گسترش مناطق دچار خشکسالی کفایت نمی‌کند. از این‌رو، بسط و گسترش مکانی و منطقه‌ای آن‌ها لازم است. زمانی که پدیده‌ها به‌صورت نقطه‌ای برداشت می‌شوند، روش‌های خاصی برای شکل دادن یا لایه ساختن آن‌ها به‌کار

جدول ۳- مقدار ریشه میانگین مربعات خطای روش‌های درون‌یابی

روش درون‌یابی	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱۲ ماهه	میانگین خطای مطلق (MAE) ۱۲ ماهه	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) شش ماهه	میانگین خطای مطلق (MAE) شش ماهه
IDW (Inverse Distance Weighting)	توان ۱	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۴۳
	توان ۲	۰/۵۶۹	۰/۴۸	۰/۴۶
	توان ۳	۰/۶۰۰	۰/۵۳	۰/۵۲
	توان ۴	۰/۶۳۴	۰/۵۵	۰/۵۲
	توان ۵	۰/۶۵۸	۰/۵۶	۰/۵۵
RBF (Radial Basis Functions)	Spline with Tension	۰/۵۶۶	۰/۴۹	۰/۴۶
	Inverse Multiqua	۰/۵۶۶	۰/۴۹	۰/۴۶
	Multiqua dic	۰/۶۶۰	۰/۵۷	۰/۵۶
	Completely Regularize Spline	۰/۵۷۱	۰/۴۹	۰/۴۹
	Thin Plate Spline	۰/۸۷۳	۰/۷۷	۰/۷۵
GPI (Global Polynomial)	توان ۱	۰/۵۶۹	۰/۵۰	۰/۴۶
	توان ۲	۰/۶۰۱	۰/۵۱	۰/۵۱
	توان ۳	۱/۱۳۰	۱/۰۲	۰/۹۹
	توان ۴	۱/۹۵۸	۱/۸۳	۱/۸۱
	توان ۵	۱۳۸/۲۹۹	۱۲۹/۸۰	۱۱۷/۷۶
Kriging	Gaussian	۰/۵۸۶	۰/۵۱	۰/۴۸
	Exponential	۰/۵۸۶	۰/۴۹	۰/۴۸
	Spherical	۰/۵۸۶	۰/۵۱	۰/۵۰
	Circular	۰/۵۸۷	۰/۵۱	۰/۵۰

برای هر ماه به‌صورت جداگانه به‌دست آورده شد. سپس، نقشه‌های این دو روش پهنه‌بندی را برای هر ماه با هم مقایسه شد.

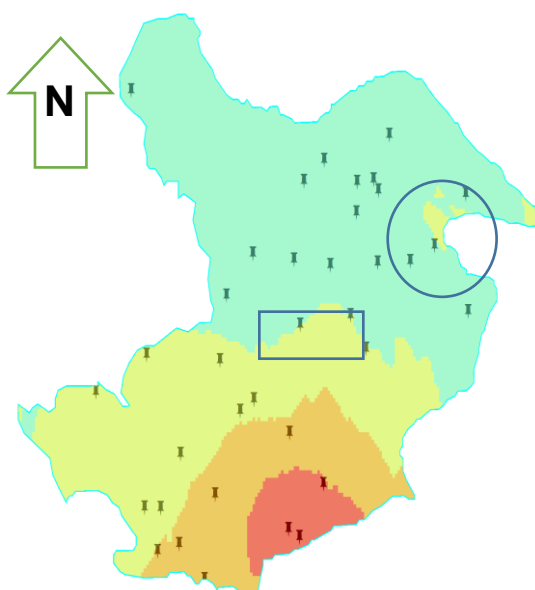
شاخص VCI برای نخستین‌بار به‌وسیله کوگان در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است. این شاخص نشان می‌دهد که چگونه NDVI ماه جاری به NDVI محاسبه شده از طریق ثبت داده‌های دراز مدت نزدیک می‌شود.

$$VIC = \frac{(NDVI_i - NDVI_{min})}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (11)$$

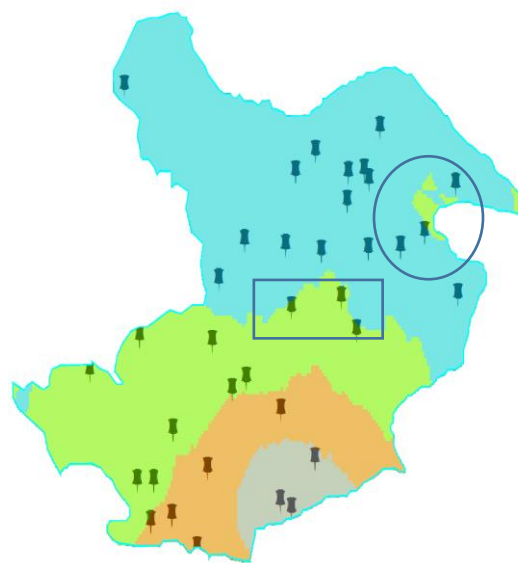
حال، برای پهنه‌بندی از روش دیگری استفاده شد. اگرچه با توجه به جدول ۳ مقدار خطای روش IDW با توان یک از دیگر روش‌ها کمتر است، ولی با توجه به این‌که مقدار خطای این روش با روش نزدیک به هم است، لذا، از روش‌های درون‌یابی Kriging در این قسمت استفاده شد. به این صورت که، ابتدا مقدار بارش را با روش درون‌یابی Kriging پهنه‌بندی کرده، به‌گونه‌ای که سطح کل استان به ۴۰۳۶۳ سلول (۱۸۱) ردیف و ۲۲۳ ستون) تبدیل شد. سپس، مقدار شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (MSPI) برای هر سلول و

در این رابطه، $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ از طریق داده‌های ثبت شده درازمدت (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱) برای اول ماه می محاسبه شده است و i نشان‌دهنده سال جاری است. شرایط و وضعیت پوشش گیاهی به وسیله VCI، به صورت درصد اندازه‌گیری می‌شود. درجه‌های مختلفی از شدت خشکسالی با VCI زیر ۴۰ درصد نشان داده می‌شود. زمانی که مقدار VCI برابر ۱۰۰ درصد باشد، مقدار NDVI برای ماه برابر $NDVI_{max}$ است. وقتی که مقدار NDVI به بیشترین مقدار نزدیک می‌شود، وضعیت خشکسالی بهبود می‌یابد. زمانی که VCI به صفر نزدیک می‌شود، نشان‌گر یک ماه بسیار خشک است و مقادیر کم VCI برای فواصل زمانی پی‌درپی، اشاره به ازدیاد خشکسالی دارد.

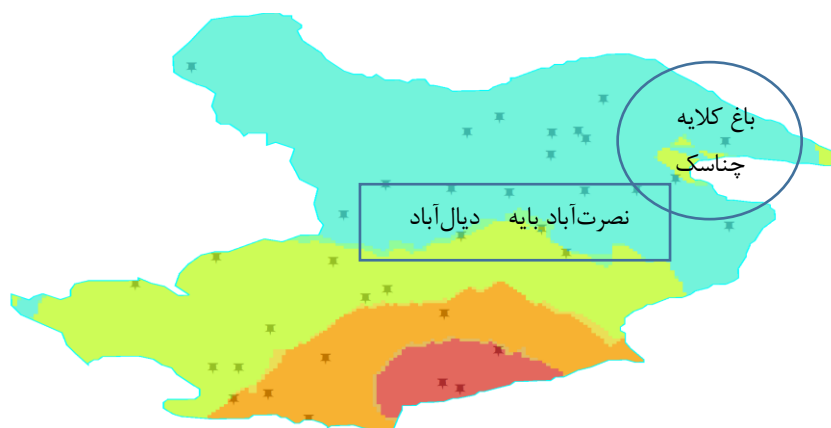
در این رابطه، $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ از طریق داده‌های ثبت شده درازمدت (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱) برای اول ماه می محاسبه شده است و i نشان‌دهنده سال جاری است. شرایط و وضعیت پوشش گیاهی به وسیله VCI، به صورت درصد اندازه‌گیری می‌شود. درجه‌های مختلفی از شدت خشکسالی با VCI زیر ۴۰ درصد نشان داده می‌شود. زمانی که مقدار VCI برابر



شکل ۴- ابتدا پهنه‌بندی بارش و سپس محاسبه MSPI



شکل ۳- ابتدا محاسبه MSPI و سپس پهنه‌بندی



شکل ۵- مقایسه دو روش

جدول ۴- مقادیر وضعیت شاخص

مقدار VCI	وضعیت خشکسالی
$VCI > 10$	خشکسالی بسیار شدید
$19/99 > VCI > 10$	خشکسالی شدید
$29/99 > VCI > 20$	خشکسالی متوسط
$39/99 > VCI > 30$	خشکسالی خفیف
$VCI > 40$	تر سالی

در این جا، نتایج پایش خشکسالی با استفاده از دو نمایه VCI و MSPI برای پنج ایستگاه شامل بیدستان (مرکز استان)، سالارکیا (شمال استان)، باغ کلایه (شمال شرق استان)، حاجی عرب (جنوب استان) و زیاران (شرق استان) مطرح می شود تا مقایسه ای بین این دو شاخص انجام شود.

جدول ۵- مقایسه وضعیت شاخص VCI و MSPI

ردیف	ایستگاه	مقدار VCI	وضعیت خشکسالی	مقدار MSPI	وضعیت خشکسالی
سال ۸۸					
۱	بیدستان	۴۸/۶۲	نرمال	۰/۵۷	نرمال
۲	سالارکیا	۴۴/۸۲	نرمال	۰/۳۳	نرمال
۳	باغ کلایه	۵۸/۳۷	نرمال	۰/۶۳	نرمال
۴	حاجی عرب	۴۸/۹۶	نرمال	۰/۲۱	نرمال
۵	زیاران	۶۴/۲۹	نرمال	۱/۴۵	خشکسالی متوسط
تعداد وضعیت خشکسالی یکسان					
۴					
سال ۸۱					
۶	بیدستان	۳۸/۸۳	خشکسالی خفیف	-۰/۱	نرمال
۷	سالارکیا	۳۸/۸	خشکسالی خفیف	-۰/۱۳	نرمال
۸	باغ کلایه	۵۲/۹۳	نرمال	۰/۳۱	نرمال
۹	حاجی عرب	۳۸/۲۱	خشکسالی خفیف	-۰/۲۴	نرمال
۱۰	زیاران	۵۳/۱۰	نرمال	۰/۵۴	نرمال
تعداد وضعیت خشکسالی یکسان					
۲					
سال ۸۰					
۱۱	بیدستان	۴۱/۱۲	نرمال	۰/۶۲	نرمال
۱۲	سالارکیا	۳۴/۹۴	خشکسالی خفیف	-۱/۳۷	خشکسالی متوسط
۱۳	باغ کلایه	۵۲/۷	نرمال	۰/۲۵	نرمال
۱۴	حاجی عرب	۳۸/۵	خشکسالی خفیف	۰/۱۱	نرمال
۱۵	زیاران	۵۱	نرمال	۱۲-۰	نرمال
تعداد وضعیت خشکسالی یکسان					
۴					

نشان می دهند. دلایل مطلوبیت دو شاخص MSPI و SPI و قرارگرفتن آن ها در رتبه نخست در حالت کلی می توان به داشتن پیچیدگی کمتر، استفاده از پارامتر بارش به تنهایی، قابل استفاده بودن برای هر مکان و استفاده از آن برای مقیاس های زمانی مختلف نام برد. با توجه به شکل ۲، از هم پوشانی قراردادن نمودارهای SPI و MSPI بر روی یکدیگر مشخص شد، شاخص MSPI مقدار خشکسالی را در سال ۱۳۸۷ منفی تر نشان می دهد (مقدار $MSPI = -2/29$ و مقدار $SPI = -2/6$)، پس، با توجه به روش سنجه کارآمد برای پایش خشکسالی، می توان نتیجه گرفت، شاخص MSPI عملکرد بهتری نسبت به شاخص SPI را دارد، زیرا وضعیت خشکسالی شدید را بهتر نشان می دهد. هر چند تفاوت این دو مقدار شاخص ناچیز است.

نتایج شاخص های به کار رفته در روش های سنجش از دور، از طریق محاسبه ضریب همبستگی با تعریف سطح معنی داری با داده های زمینی (داده های ایستگاه های باران سنجی) مورد آزمون دقت و اعتبارسنجی قرار گرفتند. این مرحله، در واقع بخش نهایی تحلیل و تفسیر نتایج به دست آمده می باشد.

نتایج و بحث

مطابق نتایج به دست آمده از جدول ۲، شاخص MSPI و شاخص SPI مقارن با سال کمینه وقوع بارندگی، وقوع خشکسالی بسیار شدید را در ایستگاه های مورد مطالعه نشان می دهند و طبق فرضیه سنجه کارآمد برای پایش خشکسالی می توان نتیجه گرفت که عملکرد بهتری در نمایش خشکسالی های شدید نسبت به دیگر شاخص ها از خود

با هم تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای دارد. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، قسمتی که با دایره مشخص شده است، نشان از لکه‌هایی است که مقدار مساحت آن از طریق روش اول (شکل ۳) بیشتر از روش دوم (شکل ۴) می‌باشد. این لکه‌ها حاکی از وجود منطقه خشک خفیف در میان منطقه‌ای است که اطراف آن مناطق نرمال است. برای بررسی آن‌که کدام پهنه‌بندی قابل قبول‌تر است، باید وضعیت خشکسالی دو ایستگاه در آن منطقه را مشخص کرد. در ایستگاه چناسک مقدار شاخص MSPI برابر -0.94 (وضعیت نرمال) و در ایستگاه باغ کلايه مقدار شاخص MSPI برابر -0.9 (وضعیت نرمال) می‌باشد. اگرچه مقادیر وضعیت خشکسالی دو ایستگاه به وضعیت خشک خفیف نزدیک است، ولی در وضعیت خشکسالی نرمال قرار دارند. پس، این یک خطا محسوب می‌شود. هر قدر مقدار مساحت کمتر باشد، مقدار خطا نیز کمتر می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، قسمتی که با مستطیل مشخص شده است، نشان می‌دهد که دو ایستگاه دیال‌آباد و نصرت‌آباد بایه در وضعیت پهنه‌بندی از روش اول در منطقه خشک خفیف قرار دارند و در وضعیت پهنه‌بندی از روش دوم ایستگاه دیال‌آباد در منطقه نرمال و ایستگاه نصرت‌آباد بایه در منطقه خشک خفیف قرار دارند. برای آن‌که مشخص شود که کدام وضعیت قابل قبول‌تر است، وضعیت توپوگرافی منطقه و نزدیک‌ترین ایستگاه به این دو و همچنین، مقدار شاخص MSPI در این دو ایستگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نقشه توپوگرافی، این منطقه در ارتفاع قرار دارد که وضعیت ارتفاعی آن‌ها به این صورت است. ایستگاه دیال‌آباد $= 1257+$ متر، ایستگاه نصرت‌آباد بایه $= 1190+$ متر و ایستگاه اسماعیل‌آباد دشت $= 1283+$ متر. مقدار شاخص خشکسالی در ایستگاه دیال‌آباد برابر -0.79 (وضعیت نرمال) و مقدار شاخص خشکسالی ایستگاه نصرت‌آباد بایه برابر با -1.33 (وضعیت خشک خفیف) می‌باشد. با توجه به مقایسه مقادیر شاخص خشکسالی از دو روش پهنه‌بندی و مقادیر واقعی حاصل برای محاسبه این دو ایستگاه، می‌توان نتیجه گرفت پهنه‌بندی از روش دوم قابل قبول‌تر می‌باشد. در جاهایی که تراکم

برای انتخاب بهترین روش پهنه‌بندی، از دو معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. نزدیک‌ترین مقادیر RMSE و MAE به مقدار صفر دارای مطلوبیت بهتری است. پس، با توجه به مقادیر جدول ۳، روش GPI نتایج قابل قبولی ارائه نکرده است. از آنجایی که روش GPI برای مناطق هموار مناسب می‌باشد، در مناطقی که تغییر ارتفاع زیاد مانند استان قزوین دارد، توصیه نمی‌شود. یافته این قسمت با نتایج پژوهش Apaydin و همکاران (۲۰۰۴) که در منطقه GAP در ترکیه انجام شده است، مطابقت دارد. با توجه به این‌که اساس مدل IDW بر مبنای این فرضیه است که در یک سطح، اثر یک پارامتر بر نقاط اطراف یکسان نیست و نقاط (ایستگاه) نزدیک، بیشتر و نقاط (ایستگاه) دور، کمتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند و هر چه فاصله از ایستگاه مبدا افزایش پیدا می‌کند، اثر متغیر کمتر می‌شود. از این‌رو، این روش بر ایستگاه‌های پرمتراکم و با پراکندگی زیاد نتایج خوبی ارائه نمی‌دهد.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد، دقت توان یک آن از سایر روش‌های IDW بهتر است. همچنین، با توجه به جدول ۳، روش RBF از نظر مقدار خطا در جایگاه مناسبی قرار دارد. چون این مدل برای حل مسایل پیش‌بینی احتیاج به مجموعه الگوهای ورودی دارد. از این‌رو، دارای این توانایی است که تا به‌عنوان یک میان‌یاب مستقل، متغیر مکانی را در یک منطقه پیش‌بینی کند. نتایج حاصل از روش Kriging شبیه روش IDW و RBF است، ولی GPI دارای نتایج بهتری است. یافته این قسمت با نتایج پژوهش، Mahdavi و همکاران (۲۰۰۴) که در منطقه خشک و نیمه‌خشک جنوب ایران انجام شده است، مطابقت دارد. پس، روش RBF، Kriging و IDW به ترتیب جزو روش‌های برتر در درون‌یابی منطقه‌ای در این پژوهش بوده است و جواب‌های بهتری ارائه کرده‌اند و همچنین، از سرعت بالاتری برخوردار هستند.

با توجه به آن‌که وجود خطا در روش‌های پهنه‌بندی یک امری طبیعی است، با تحلیل بر روی نقشه‌ها می‌توان تا حدودی از مقدار خطا کاست. اگرچه شکل‌های ۳ و ۴ بسیار نزدیک به هم است، ولی

۲- از مقایسه دو روش پهنه‌بندی، می‌توان به این نتیجه رسید که اگر ابتدا بارش را در سطح حوضه پهنه‌بندی و بعد شاخص خشکسالی محاسبه شود، نسبت به روشی که ابتدا شاخص خشکسالی را برای ایستگاه‌ها محاسبه و سپس، پهنه‌بندی شود، از دقت بیشتری برخوردار است. یکی از دلایل مهم این نتیجه‌گیری، این است که اگر ابتدا بارش را در سطح حوضه پهنه‌بندی شود، به‌طور مجازی تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی از ۳۵ ایستگاه به ۴۰۳۶۳ ایستگاه افزایش پیدا کرد که طبیعی است، افزایش تعداد ایستگاه‌ها باعث افزایش دقت در محاسبات می‌شود. اما زمان رسیدن به جواب، بیشتر و طولانی‌تر می‌باشد که از معایب این روش است. این روش، یک روش جدید است که می‌تواند برای پهنه‌بندی خشکسالی استفاده شود.

۳- استفاده از تصاویر ماهواره‌ای روش بسیار مناسبی برای تحلیل خشکسالی در مناطق مختلف کشور ایران است. زیرا، شاخص MSPI تا حدود زیادی نتایج شاخص VCI را تایید می‌کند. بنابراین، شاخص VCI روش بسیار مناسبی برای ارزیابی و تحلیل خشکسالی است. مزیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، کاربرد آن‌ها در مناطقی است که یا در آن‌جا ایستگاه‌های هواشناسی وجود نداشته، یا به‌صورت پراکنده هستند، به‌طوری که می‌توان در چنین مناطقی از این داده‌ها برای برآورد خشکسالی با دقت و سرعت بالا استفاده کرد.

ایستگاه‌ها در حالت عادی زیاد است، (قسمت شمال استان) تفاوت محسوسی از طریق دو روش ایجاد نشده است.

در این تحقیق، کارایی شاخص VCI در تحلیل خشکسالی کشاورزی استان قزوین مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ استفاده شد. مدل مورد بررسی در این پژوهش، شاخص VCI بود که این شاخص خود از شاخص NDVI به‌دست می‌آید. برای ارزیابی این شاخص، از شاخص MSPI استفاده شد. برای این منظور، نتایج دو شاخص مذکور در موقعیت ایستگاه‌های کلیماتولوژی و سینوپتیک استخراج شد. همان‌طور که مشاهده شد، ضریب همبستگی بین شاخص VCI و MSPI برابر با ۰/۷۲ به‌دست آمد که نشان می‌دهد شاخص MSPI تا حدود زیادی نتایج شاخص VCI را تایید می‌کند. بنابراین، شاخص VCI روش بسیار مناسبی برای ارزیابی و تحلیل خشکسالی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

۱- این پژوهش، در ۳۵ ایستگاه سینوپتیک منطقه استان قزوین مورد مطالعه قرار گرفت. عملکرد شاخص‌های SPI اصلاح شده، SPI، MCZI، ZSI، DI و CZI در تشخیص بهترین شاخص خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که شاخص استاندارد بارش اصلاح شده (MSPI) برای پایش خشکسالی عملکرد بهتری دارد.

منابع مورد استفاده

- Abolverdi, J. and D. Khalili. 2010. Probabilistic analysis of extreme regional meteorological droughts by L-moments, in a semi-arid environment. *Theoretical and Applied Climatology*, 102: 351-366.
- Agrawala, S., M. Barlow, H. Cullen and B. Lyon. 2001. The drought and humanitarian crisis in central and southwest Asia: a climate perspective, IRI special report No. 01-11. International Research Institute for Climate Prediction, Palisades, 24 pages.
- Angelidis, P., F. Maris, N. Kotsovinos and V. Hrissanthou. 2012. Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Journal of Water Resources Management*, 26: 12-26.
- Barua, S., A.W.M. Ng and B.J.C. Perera. Comparative evaluation of drought indices: a case study on the Yarra River Catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(2): 215-226
- Cancelliere, A., G. Di Mauro, B. Bonaccorso and G. Rossi. 2007. Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resources Management*, 21: 801-819.
- Ensafi Moghaddam, T. 2007. An investigation and assessment of climatological indices and determination of suitable index for climatological droughts in the Salt Lake Basin of Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 14(2): 271-288 (in Persian).

7. Faraji Sabokbar, H. and Gh. Azizi. 2006. Assessment the accuracy spatial interpolation methods, case study: modeling of rainfall in the Mashhad Kardeh Catchment. *Geographical Research*, 38(58): 1-15 (in Persian).
8. Ghahroudi Tali, M. 2002. Assessing interpolation by Kriging method. *Physical Geography Research Quarterly*, 43: 95-108 (in Persian).
9. Lloyd-Hughes, B. and M.A. Saunders. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22: 1571-1592.
10. Hayes, M.J., M.D. Svoboda, D.A. Wilhite and O.V. Vanyarkho. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3): 429-438.
11. Heim, R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1149-1165.
12. Kao, S.C. and R.S. Govindaraju. 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 380: 121-134.
13. Karimi, B., M. Mahdavi, Kh. Osati, S.A. Sadeghi and J. Mobaraki. 2010. Determining suitable probability distribution models for annual precipitation data (a case study of Mazandaran and Golestan provinces). *Journal of Sustainable Development*, 3(1): 159-168 (in Persian).
14. Khalili, A. and J. Bazrafshan. 2003. Performance evaluation of some drought indexes in different climates of Iran. *Journal of Nivar*, 48-49: 79-93.
15. Khosravi, Y. and Kh. Mozafari. 2015. Error analysis in the evaluation of the SPI drought index using geostatistical methods, case study of Bushehr Province. *Journal of Geography*, 14(48): 189-212 (in Persian).
16. Madani, H. 1994. Introduction to geostatistic. Amirkabir University Press, 659 pages (in Persian).
17. McKee, T.B, N.J. Doeskin and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 179-184. January 17-22, Anaheim, California.
18. Mirabbasi, R., E.N. Anagnostou, A. Fakhri-Fard, Y. Dinpashoh and S. Eslamian. 2013. Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the joint deficit index. *Journal of Hydrology*, 492: 35-48 (in Persian).
19. Misaghi, F. and K. Mohammadi. 2006. Spatial analysis of rainfall data using classical statistical methods and geostatistics and compared with artificial neural network. *Journal of Agriculture*, 29(4): 1-13 (in Persian).
20. Moradi, H. R., M. Rajabi and M. Farajzadeh. 2011. Investigation of meteorological drought characteristics in Fars Province, Iran. *Catena*, 84: 35-46 (in Persian).
21. Moreira, E.E., C.A. Coelho, A.A. Paulo, L.S. Pereira and J.T. Mexia. 2008. SPI-based drought category prediction using log linear models. *Journal of Hydrology*, 354: 116-130.
22. Morid, S., Sh. Paymouz and M. Moghaddasi. 2004. Monitoring of the 1998-2000 drought in Tehran Province, using EDI, SPI, DI indices and geographical information system. *Journal of Modarres Humanity Science (Iran)*, 9(1): 197-215 (in Persian).
23. Naserzadeh, M.H. and E. Ahmadi. 2012. Study of meteorological drought index in drought monitoring and mapping. *Journal of Geosciences*, 27: 141-162 (in Persian).
24. Palmer, W.C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index. *Weatherwise*, 21: 156-161.
25. Saghafian, B., S. Rahimi Bandar Abadi, H. Taheri Shahraini and J. Ghayoomian. 2005 The effects of station density and regional clustering on spatial distribution of daily rainfall, case study: southwest parts of Iran. *Esteghlal Journal*, 24: 59-75 (in Persian).
26. Shafer, B.A. and L.E. Dezman. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings of the Western Snow Conference*, 164-175, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
27. Thom, H.C.S. 1966. Some methods of climatological analysis. *WMO Technics/Note Number*, 81: 16-22.
28. Wilhite, D.A. 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. *Drought: A Global Assessment*, London, Routledge, UK, 3-18.
29. Wilhite, D.A. 1993. Drought assessment, management and planning: theory and case studies. Kluwer Academic Publishers, USA, 293 pages.