



## Development of ADI, the Aggregate Drought Index, Based on Principle Component Analysis for Monitoring Agricultural Drought in Golestan Province, Iran

M. Ghabaei Sough<sup>1\*</sup>, H. Zare Abyaneh<sup>2</sup>  
and Abolfazl Mosaedi<sup>3</sup>

### Abstract

Univariate indices can be useful for certain purposes but are unable to comprehensively monitor drought characteristics as a complex climate phenomenon. In this study, to monitor agricultural drought conditions in Golestan province, the multivariate index ADI has been developed based on Principle Component Analysis (PCA) technique using the results of drought indices as inputs. For this purpose the daily meteorological variables from 10 synoptic and evaporative stations were obtained for 33 hydrological years to compute the values of 5 drought indices i.e. Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Evapotranspiration-Precipitation Index (SPEI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Z-Index, and Soil Moisture Index (SMI) in monthly timescale. Then by applying PCA technique and considering all established components, the ADI drought index was developed based on linear combinations of derivation components for each of the studied stations. Finally the ADI results were compared to common indices such as SPEI and SPI. The results showed a strong correlation coefficient between ADI and SPEI indices in wet regions and months of November to March based on Kendal-Tau (greater than 0.8). The degree of correlation were reduced during warm months of April to June. Comparative study on the results of ADI and SPEI showed that the ADI index as a multivariate index could reflect the effects of input drought indices such as SMI and Z-Index and present a more comprehensive drought monitoring.

**Keywords:** Soil-Water Balance Models, PCA technique, Soil Moisture Index (SMI), Palmer Drought Severity Index, Golestan province.

Received: September 29, 2016

Accepted: December 2, 2016

## توسعه‌ی شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI) بر پایه‌ی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به منظور پایش خشکسالی کشاورزی در استان گلستان - ایران

محمد قبائی سوق<sup>۱\*</sup>، حمید زارع ابیانه<sup>۲</sup> و ابوالفضل مساعدی<sup>۳</sup>

### چکیده

شاخص‌های تک متغیره برای اهداف و کاربردهای مشخص تا حد زیادی مفید می‌باشند، اما تصویر جامعی از ویژگی‌های خشکسالی به عنوان یک پدیده پیچیده‌ی اقلیمی ارائه نمی‌نمایند. در این پژوهش با محاسبه‌ی شاخص‌های مختلف خشکسالی به عنوان ورودی و استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI) جهت پایش خشکسالی کشاورزی در سطح استان گلستان توسعه داده شد. بدین منظور با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی در ۱۰ ایستگاه تخیرسنجی و سینوپتیک موجود در سطح استان گلستان مقادیر پنج شاخص پرکاربرد خشکسالی شامل: بارش استاندارد شده (SPI)، بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شاخص خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص Z (مشقت شده از شاخص پالم) و شاخص رطوبت خاک (SMI) در مقیاس ماهانه طی ۳۳ سال زراعی برآورد شدند. سپس با اعمال روش PCA، شاخص ADI از ترکیب خطی مؤلفه‌های حاصل از شاخص‌های ورودی برای هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی توسعه داده شد. بر پایه‌ی نتایج بدست آمده همبستگی قوی (بیشتر از 0.8) بین مقادیر شاخص ADI و SPEI در نواحی مرطوب و ماه‌های آذر تا اسفند در ایستگاه‌های مورد بررسی مشاهده شد در حالی که طی ماه‌های گرم سال (شامل فروردین تا خرداد) از مقدار ضریب همبستگی کاسته شده است. بررسی تطبیقی نتایج شاخص ADI با شاخص SPEI در ماه‌های مختلف سال به ویژه ماه‌های اردیبهشت و خرداد نشان می‌دهد که شاخص ADI به عنوان یک شاخص جامع می‌تواند اثرات شاخص‌های خشکسالی ورودی نظیر رطوبت خاک را منعکس و پایش جامع‌تری را در اختیار دهد.

**کلمات کلیدی:** مدل توازن آب خاک، روش PCA، شاخص رطوبت خاک (SMI)، شاخص شدت خشکسالی پالم، استان گلستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۷/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۹/۱۲

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: ghabaei.m63@gmail.com

2-Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

3-Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۳- استاد دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

روش توصیف مدل می‌باشد به طوری که حجم بالایی از اطلاعات موجود توسط دسته‌های کوچک‌تری از اطلاعات توصیف می‌گردد. بر این اساس با کم‌ترین تعداد مؤلفه‌ی اصلی از متغیرهای ترکیب یافته، ساختاری از اطلاعات بوجود می‌آید که حداکثر ویژگی از داده‌های اولیه را دارا می‌باشند. پیشینه‌ی استفاده از روش PCA برای کاهش حجم و توصیف داده‌های هواشناسی و علوم هیدرولوژی به چند دهه‌ی پیش باز می‌گردد اما استفاده از این روش برای استخراج شاخص‌های خشکسالی نخستین بار توسط Keyantash and Dracup (2004) با معرفی شاخص تجمیعی خشکسالی<sup>۲</sup> (ADI) آغاز شد. آن‌ها شاخص ADI را از ترکیب پارامترهای مؤثر بر خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی توسعه و به منظور پایش جامع خشکسالی پیشنهاد دادند. آن‌ها بیان‌داشتند که ساختار ADI روشی هدفمند و روشن برای توصیف شدت خشکسالی ارائه می‌نماید و به راحتی می‌تواند برای بیان ویژگی‌های خشکسالی در کارهای اجرایی بکار رود.

Rajsekhar et al. (2015) با برجسته نمودن مزیت‌های روش مبتنی بر تئوری آنتروپی و روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی<sup>۳</sup> (KECA) نسبت به روش‌های PCA و روش PCA مبتنی بر الگوریتم کرنال<sup>۴</sup> (KPCA)، شاخص چند متغیره خشکسالی<sup>۵</sup> (MDI) را از ترکیب متغیرهای بارندگی، رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک بر مبنای ترکیب تئوری آنتروپی و روش PCA در نواحی مختلف اقلیمی ایالت تگزاس طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۲ توسعه داده و نتیجه‌گیری نمودند که شاخص MDI در مقایسه با شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)<sup>۶</sup> وقایع خشکسالی سال‌های ۱۹۵۷-۱۹۵۰ را ناشی از چند متغیره بودن، مقیاس‌پذیری و ویژگی‌های غیرخطی شاخص MDI می‌دانند. Yu et al. (2015) به منظور ایجاد شاخص‌هایی با کاربرد گسترده در سیستم‌های پایش و هشدار خشکسالی در چین، شاخص‌های ترکیبی در مقیاس‌های کوتاه مدت و بلند مدت را بر مبنای روش PCA توسعه دادند. آن‌ها برای توسعه‌ی شاخص کوتاه مدت از نتایج شاخص‌های واسنجی‌شده پالم (sc-PDSI)<sup>۷</sup>، بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)<sup>۸</sup> در مقیاس‌های زمانی ۱ و ۳ ماه، شاخص Z و رطوبت خاک (SMI)<sup>۹</sup> و برای توسعه‌ی شاخص بلند مدت از نتایج شاخص‌های واسنجی‌شده پالم هیدرولوژیکی<sup>۱۰</sup> (Sc-PHDI)، شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه، شاخص جریان رودخانه‌ای استاندارد شده<sup>۱۱</sup> (SSI) و شاخص SMI استفاده نمودند. آن‌ها مقادیر رطوبت خاک و رواناب را با استفاده از مدل توزیعی ژیناچینگ<sup>۱۲</sup> بدست

به طور سنتی هنوز در بسیاری از مطالعات از مقدار بارش به منظور پایش خشکسالی استفاده می‌شود و خشکسالی اساساً در ارتباط با کمبود بارش تعریف می‌گردد. اما امروزه بیشتر کارشناسان پذیرفته‌اند که خشکسالی یک پدیده‌ی چندمتغیره می‌باشد و نوسانات هر یک از متغیرهای جوی و اقلیمی می‌تواند سبب افزایش یا کاهش شدت این پدیده گردد (Govindaraju, 2013). نتایج پژوهش‌های جدید نیز نشان می‌دهد که یک روش تک متغیره نمی‌تواند بهترین روش برای توصیف ویژگی‌های خشکسالی باشد و تعیین وقایع خشکسالی بر اساس یک متغیر یا یک معرف منفرد نظیر بارندگی، رطوبت خاک و رواناب برای ارزیابی واقعی خطرپذیری و تصمیم‌سازی ممکن است به تنهایی کافی نباشد (Hao and AghaKouchak, 2013). با گذشت زمان و افزایش دانش متخصصان از پدیده‌ی خشکسالی و نحوه‌ی اثرگذاری سایر عوامل هواشناختی و هیدرولوژیکی بر این پدیده، توسعه‌ی شاخص‌های جدیدتر با سعی در دخالت دادن این عوامل در محاسبات، همراه بوده است.

از دهه‌های گذشته تلاش‌های مختلفی برای توسعه‌ی شاخص‌های چند متغیره برپایه‌ی ترکیب شاخص‌ها یا معرف‌های مختلف خشکسالی به منظور ارائه‌ی تصویری جامع از شرایط و ویژگی‌های این پدیده شده است. یکی از نخستین تلاش‌ها در این باره برای پایش خشکسالی در ایالات متحده انجام شده است که در آن اطلاعات بدست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده نظیر بارش، دما، رطوبت خاک، جریان رودخانه‌ای، حجم برف پشته و آب معادل برف از طریق شاخص‌های مختلف خشکسالی با هم ترکیب و یک شاخص واحد را ارائه می‌دهند (Svoboda et al., 2002). پژوهشگران مختلف به منظور توسعه‌ی شاخص‌های چند متغیره از روش‌ها و تئوری‌های مختلفی نظیر ترکیب متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق در مدل‌های مختلف آماری، استفاده از نتایج متغیرهای مستخرج از مدل‌های بیلان آب، توابع کوپلا (مفصل)، مدل اسکالوگرام، روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)<sup>۱</sup>، تئوری آنتروپی، روش زنجیره مارکوف پنهان و روش‌های پارامتری و ناپارامتری استفاده نمودند (Hao and Singh, 2015; Ghabaei Sough et al., 2016).

روش PCA از روش‌های استخراج ویژگی و فشرده‌سازی اطلاعات می‌باشد که در حوزه‌های جبر خطی و تحلیل‌های برداری مورد بحث تئوری و پژوهش‌های فراوان قرار گرفته است. استخراج ویژگی، یک

آوردند. مقایسه‌ی نتایج شاخص‌های ترکیبی توسعه داده شده در مقیاس‌های بلند مدت و کوتاه مدت با شاخص‌های معمول sc-PDSI و SPEI در حوضه رودخانه‌ی هوایه<sup>۱۳</sup> واقع در چین نشان داد که شاخص‌های ترکیبی شروع، شدت و دوره‌ی ماندگاری وقایع خشکسالی را به شکل بهتری نشان می‌دهند.

Li et al. (2015) برای توسعه‌ی یک شاخص چند متغیره پایش خشکسالی (MDI) در حوضه رودخانه‌ی هوایه واقع در چین از داده‌های رواناب، رطوبت خاک (بدست آمده از مدل توزیعی ژیناچینگ)، تبخیر و تعرق و بارش بر مبنای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده نمودند. نتایج شاخص چند متغیره توسعه داده شده برای وقایع خشکسالی طی سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ با نتایج شاخص‌های sc-PDSI و SPI مقایسه شدند که نتایج نشان‌دهنده‌ی برتری شاخص‌های MDI و بارش استاندارد شده (SPI)<sup>۱۴</sup> نسبت به شاخص sc-PDSI می‌باشد هرچند نتایج شاخص MDI از برتری و تطابق بیشتری با دوره‌های خشکسالی مورد بررسی برخوردارند. آن‌ها مهم‌ترین مزیت شاخص MDI را ساختار و توانایی آن برای در نظر گرفتن متغیرهای مهم و مؤثر بر خشکسالی بیان کردند.

Bazrafshan et al. (2015) شاخص چند متغیره زمانی بارش استاندارد شده اصلاح شده (MSPI)<sup>۱۵</sup> را بر مبنای ۵ پنجره‌ی زمانی مختلف شاخص SPI با استفاده از روش PCA در چهار ایستگاه سینوپتیک ایران با شرایط مختلف آب و هوایی توسعه دادند. آن‌ها با بیان این که مؤلفه اول قادر به برآورد ۷۴ درصد واریانس تجمعی می‌باشد از آن برای محاسبه‌ی شاخص MSPI استفاده نمودند. مقایسه‌ی نتایج شاخص MSPI با شاخص SPI بیانگر رضایت بخشی شاخص توسعه داده شده در پایش دوره‌های خشک و مرطوب در ایستگاه‌های مورد بررسی بوده است. آن‌ها بیان داشتند شاخص‌های چند متغیره به دلیل در نظر گرفتن مقیاس‌های زمانی مختلف در خود و ارائه‌ی آن‌ها به صورت یک شاخص واحد می‌توانند نسبت به شاخص‌های تک متغیره بهتر عمل کنند، زیرا به طور همزمان می‌توانند خشکسالی‌های کوتاه مدت و بلندمدت را به صورت یک شاخص واحد تفسیر کنند. ضمن آنکه تصمیم‌گیری بر مبنای یک شاخص چند متغیره کاراتر و مؤثرتر از یک شاخص تک متغیره می‌باشد. Dehban et al. (2015) شاخص چند متغیره زمانی شناسایی خشکسالی تصحیح شده (MRDI)<sup>۱۶</sup> را بر پایه‌ی شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)<sup>۱۷</sup> در پنجره‌های زمانی مختلف (۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه) با استفاده از روش PCA در هفت ایستگاه تبخیرسنجی از حوضه گرگانود ارائه و نتایج آن را با شاخص MSPI

مقایسه و بیان داشتند که بر مبنای آزمون ناپارامتری کلموگروف-اسمیرنوف تفاوت معنی‌داری بین نتایج شاخص‌های MRDI و MSPI در ایستگاه‌های مورد بررسی وجود ندارد.

بررسی سوابق پژوهش‌های منتشر شده نشان می‌دهد که با توجه به ساختار و توانایی PCA می‌توان از ترکیب شاخص‌ها یا معرف‌های خشکسالی، یک شاخص واحد استخراج کرد که بیشترین واریانس ممکن داده‌های اولیه را توجیه کند. در این پژوهش تلاش شده است تا با تکیه بر ساختار شاخص نسبتاً جدید ADI، شاخصی چند متغیره برای پایش خشکسالی کشاورزی در دوره‌ی کشت گندم در سطح استان گلستان توسعه داده شده و با شاخص‌های موجود مورد ارزیابی قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی و داده‌های مورد استفاده

استان گلستان با وسعتی بالغ بر ۲۰۳۸۷ کیلومتر مربع در جنوب شرقی دریای خزر واقع شده و در حدود ۱/۳ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود. این استان با متوسط بارندگی سالانه ۴۵۸ میلی‌متر در سال تحت تأثیر عوامل مختلف آب و هوایی و جغرافیایی، اقلیم‌های مختلف آب و هوایی از اقلیم نیمه‌خشک در نوار مرزی و حوضه آبریز اترک تا معتدل و نیمه‌مرطوب در مناطق جنوبی و غربی تا اقلیم سرد کوهستان در مناطق مرتفع و کوهستانی در آن مشاهده می‌شود (Mosaedi et al., 2007). به منظور انجام این پژوهش با بررسی ایستگاه‌های تبخیرسنجی و سینوپتیک موجود در استان گلستان، ۱۰ ایستگاه با طول دوره‌ی آماری مناسب که دارای داده‌های طولانی مدت از بارش و متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و رطوبت-نسبی بودند انتخاب شدند. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های آب و هوایی ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده‌اند. دوره‌ی آماری در نظر گرفته شده بر اساس سال شمسی آبی (مهر تا شهریور)، سال‌های ۶۱-۱۳۶۰ تا ۹۳-۱۳۹۲ را با توجه به آمار موجود در هر ایستگاه پوشش می‌دهد. لازم به ذکر است در این پژوهش از معادل میلادی سال‌های شمسی مورد استفاده (۸۲-۱۹۸۱ تا ۱۴-۲۰۱۳) و ماه‌های اکتبر تا ژوئن در جداول و شکل‌ها استفاده شده است. جهت بررسی کیفیت داده‌های روزانه بارش، دماهای حداقل و حداکثر و رطوبت‌نسبی از آزمون‌های ارائه شده در بسته‌ی iki.dataclim در نرم‌افزار R (Van der Loo, 2010) استفاده گردید که پس از تعیین داده‌های اشتباه و گمشده در سری‌های زمانی

## ۲-۲- شاخص‌های خشکسالی کشاورزی

شاخص‌های خشکسالی متعددی برای پایش خشکسالی کشاورزی در سیستم‌های کشاورزی بکار می‌روند که از جنبه‌های مختلف نظیر مفاهیم پایه، داده‌های مورد نیاز، هدف پایش، پیچیدگی، عمومیت، مبتنی بر روابط خاک، گیاه و اتمسفر<sup>۲۲</sup> (SPA)، قدرت تفکیک پایش مکانی و زمانی متفاوت می‌باشند (Woli et al., 2012). خشکسالی کشاورزی در اثر کمبود کوتاه مدت بارش، ناهنجاری‌های دما و کمبود رطوبت خاک حاصل می‌شود. از این‌رو نگاه غالب در توسعه‌ی شاخص‌های خشکسالی کشاورزی مبتنی بر پایش و دیده‌بانی توازن آب خاک و کمبودهای رطوبتی ناحیه‌ی ریشه‌ی گیاه در اثر وقایع خشکسالی می‌باشد (Sivakumar et al., 2011).

دما و رطوبت نسبی با استفاده از مقدار میانگین درازمدت هر روز مقادیر آن‌ها جایگزین شدند. آمار ناقص بارندگی روزانه ایستگاه مینودشت نیز از روش نسبت‌ها با استفاده از آمار ایستگاه لزوره برآورد گردید. در جدول ۲ تعداد و درصد داده‌های ناقص در سری‌های روزانه متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های مورد بررسی آورده شده‌اند. همچنین برای انجام آزمون همگنی داده‌های بارش از آزمون‌های نرمال استاندارد (SNH)<sup>۱۸</sup>، دامنه‌ی بیشاند (BHR)<sup>۱۹</sup>، پیت (PET)<sup>۲۰</sup> و نسبت ون- نیومن (VON)<sup>۲۱</sup> به صورت ترکیبی استفاده شده است (Doerffer and Schiller, 2008).

**Table 1- Geographical and climatic characteristics of selected stations in Golestan province**

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و خصوصیات آب و هوایی ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح استان گلستان

| Town            | Station        | Geographic coordinates |              |               | Average annual precipitation (mm) | Average annual ET <sub>o</sub> (mm) |
|-----------------|----------------|------------------------|--------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
|                 |                | Longitude (E)          | Latitude (N) | Elevation (m) |                                   |                                     |
| Aq-qala         | Aq-qala        | 54-30                  | 37-01        | -12           | 413                               | 1238                                |
|                 | Sad Gorgan     | 54-44                  | 37-12        | 12            | 338                               | 1130                                |
|                 | Behlake Dashli | 54-47                  | 37-03        | 24            | 402                               | 1060                                |
| Bandar Torkaman | Gafar Haji     | 54-08                  | 36-59        | -22           | 455                               | 960                                 |
| Ramyian         | Ramyian        | 55-08                  | 37-01        | 200           | 855                               | 1063                                |
| Ali Abad        | Fazel Abad     | 54-45                  | 36-54        | 210           | 698                               | 1067                                |
| Kalaleh         | Tamar          | 55-30                  | 37-29        | 132           | 554                               | 1162                                |
| Gorgan          | Gorgan         | 54-24                  | 36-54        | 13.3          | 528                               | 999                                 |
| Gonbad          | Araz Koseh     | 55-09                  | 37-13        | 34.5          | 429                               | 1201                                |
| Minudasht       | Minudasht      | 55-24                  | 37-13        | 155           | 676                               | 1070                                |

**Table 2- The percent and number of missing data in meteorological variable daily time series**

جدول ۲- تعداد و درصد داده‌های ناقص در سری‌های روزانه متغیرهای هواشناسی

| Station        | Minimum Temperature |         | Maximum Temperature |         | Relative Humidity |       | Precipitation |         |
|----------------|---------------------|---------|---------------------|---------|-------------------|-------|---------------|---------|
|                | count               | percent | count               | percent | percent           | count | count         | percent |
| Aq-qala        | 1072                | 9.2     | 258                 | 2.2     | 77                | 0.07  | 4             | 0.00    |
| Sad Gorgan     | 164                 | 1.3     | 13                  | 0.01    | 9                 | -     | -             | -       |
| Behlake Dashli | 670                 | 5.5     | 294                 | 2.5     | 74                | 0.06  | -             | -       |
| Gafar Haji     | 53                  | 0.04    | 32                  | 0.03    | -                 | -     | -             | -       |
| Ramyian        | 217                 | 1.9     | 60                  | 0.05    | 4                 | 0.00  | -             | -       |
| Fazel Abad     | 699                 | 5.8     | 89                  | 0.07    | 8                 | -     | -             | -       |
| Tamar          | 73                  | 0.06    | 18                  | 0.01    | 3                 | 0.00  | 3             | 0.00    |
| Gorgan         | 11                  | 0.01    | 13                  | 0.01    | 5                 | 0.00  | -             | -       |
| Araz Koseh     | 32                  | 0.01    | 3                   | 0.00    | 2                 | 0.00  | -             | -       |
| Minudasht      | 579                 | 5.2     | 584                 | 5.2     | 524               | 4.6   | 211           | 1.8     |

مناسب‌ترین توزیع احتمال در یافتن مقادیر SPI و SPEI می‌باشد که برای شاخص SPI در تطابق با توزیع پیش‌فرض پیشنهاد شده (توزیع گاما) و برای شاخص SPEI در تضاد با توزیع پیش‌فرض لوگ‌لوژیستیک سه پارامتری می‌باشد که توسط Vicente-Serrano et al. (2010) پیشنهاد شده بود می‌باشد. Stagge et al. (2016) این موضوع را با استفاده از داده‌های ۱۱ منطقه واقع در نقاط مختلف اقلیمی جهان که در پژوهش Vicente-Serrano et al. (2010) بکار گرفته شده بودند نیز بررسی و نتیجه‌ی مشابهی را گزارش نمودند.

#### ۲-۴- شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) و شاخص Z

شاخص PDSI، در سال ۱۹۶۵ به‌عنوان اولین شاخص جامع خشکسالی توسط پالم ارائه شد. این شاخص معروف‌ترین و پرکاربردترین شاخص خشکسالی کشاورزی است که بیانگر انحراف تأمین رطوبت خاک در یک ماه خاص و در یک منطقه معین، از شرایط اقلیمی متوسط متناظر با آن ماه خاص و در ناحیه‌ی مشخص می‌باشد (Karamouz and Araghinejad, 2005). شاخص PDSI دارای برخی نقاط قوت می‌باشد که سبب شده است پژوهشگران مختلفی در سراسر دنیا برخلاف انتقادات وارده به آن، به‌طور گسترده‌ای از آن استفاده نمایند. این پژوهشگران با توجه به ساختار خاص این شاخص و توانایی آن در تعیین شدت، تداوم، زمان شروع و خاتمه دوره‌های خشک، از آن به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، برای پایش دوره‌های خشک، مدیریت و برنامه‌ریزی نام برده‌اند. ضمن آن که در ساختار این شاخص، پارامترهای دما و خصوصیات خاک نیز دخالت دارند. شاخص Z نیز از شاخص پالم مشتق شده است که برای پایش دوره‌های ماهیانه خشک و تر به صورت منفرد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

محاسبه شاخص پالم بر مبنای بیلان اقلیمی آب و با استفاده از داده‌های طولانی مدت درجه حرارت و بارندگی به عنوان اطلاعات ورودی انجام می‌شود. براساس مقادیر محاسبه شده برای مقادیر پتانسیلی شامل پتانسیل تغذیه (PR)، پتانسیل تلفات یا تخلیه (PL)، پتانسیل رواناب (PRO) و پتانسیل تبخیر و تعرق (PE)، ضرایب مربوط به عوامل مختلف شامل ضریب تبخیر و تعرق ( $\alpha$ )، ضریب تغذیه ( $\beta$ )، ضریب رواناب ( $\gamma$ ) و ضریب تلفات ( $\delta$ ) مطابق روابط ۱ محاسبه می‌گردند.

$$\alpha_i = \frac{\overline{ET_i}}{\overline{PE_i}} \quad \beta_i = \frac{\overline{R_i}}{\overline{PR_i}} \quad \gamma_i = \frac{\overline{RO_i}}{\overline{PRO_i}} \quad \delta_i = \frac{\overline{L_i}}{\overline{PL_i}} \quad (1)$$

در این پژوهش با بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی موجود تلاش شده است تا با انتخاب شاخص‌های رایج و پرکاربرد منفرد یا چندمعرفه به توسعه‌ی شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI) اقدام شود. بدین منظور از نتایج شاخص‌های خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI)، بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شدت خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص Z (مشتق شده از شاخص پالم) و رطوبت خاک (SMI) به عنوان متغیرهای موثر بر وقایع خشکسالی استفاده شده است که در ادامه توضیحات مربوط به هر یک از آن‌ها ارائه می‌شوند.

#### ۲-۳- شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص SPI یکی از شاخص‌های پرکاربرد طی دهه‌های اخیر به منظور پایش خشکسالی در سراسر جهان می‌باشد که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر این شاخص در دوره‌های زمانی مورد نظر، با برازش تابع توزیع گامای دو پارامتری بر داده‌های بارندگی و تبدیل آن به توزیع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف از معیار یک، بدست آمده است. روابط استفاده شده برای این تبدیل بر اساس روابط ارائه شده توسط (Lloyd-Hughes and Saunders, 2002) می‌باشد. بر اساس این شاخص، دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار  $-1$  یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد.

شاخص SPEI با ترکیب حساسیت شاخص PDSI به تغییرات تقاضای تبخیر، ساده‌سازی محاسبات و قابلیت محاسبه در مقیاس‌های مختلف زمانی شاخص SPI توسط Vicente-Serrano et al. (2010) توسعه یافته است. برای محاسبه‌ی شاخص SPEI در گام نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد شود. سپس از طریق یک مدل ساده‌ی بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی (P) و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای ماه  $i$  ( $D_i = P_i - PET_i$ ) محاسبه و همانند روش ارائه شده برای محاسبه‌ی شاخص SPI، مقادیر احتمال تجمعی  $D_i$  از طریق برازش توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) به جای توزیع لوگ‌لوژیستیک و تبدیل آن به نرمال استاندارد شده برآورد می‌گردد. Stagge et al. (2015) در پژوهشی مناسب‌ترین توابع برای یافتن مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI را در اروپا بررسی نمودند. بر اساس یافته‌های آن‌ها توزیع دوپارامتری گاما و توزیع سه پارامتری GEV

$$Z = d \cdot K \quad (۶)$$

$$PDSI_i = 0.897PDSI_{i-1} + \frac{1}{3}Z_i \quad (۷)$$

در رابطه‌ی فوق مقدار PDSI ماه اول در دوره‌ی خشک یا تر برابر  $\frac{1}{3}Z_i$  می‌باشد (Wellset al., 2004).

## ۲-۵- محاسبه‌ی شاخص رطوبت خاک (SMI) با استفاده از مدل دولایه‌ی توازن آب و خاک

در این پژوهش به منظور برآورد مقدار رطوبت روزانه خاک ناحیه‌ی ریشه گیاه گندم زمستانه از مدل دولایه‌ی توازن آب خاک توسعه داده شده توسط Ebrahimpour et al. (2014) استفاده گردید. در مدل ارائه شده، لایه‌ی اول منطقه‌ی رشد فعلی ریشه است و با گذشت زمان عمق آن افزایش می‌یابد. لایه‌ی دوم، بین انتهای لایه‌ی اول و حداکثر عمق توسعه‌ی ریشه می‌باشد که ضخامت آن با افزایش رشد ریشه کاهش می‌یابد و در زمان حداکثر رشد ریشه، ضخامت این لایه به صفر می‌رسد. در این مدل تا زمانی که ریشه‌ی گیاه به عمق پایین‌تر منتقل می‌شود، از رطوبت ذخیره شده در لایه‌ی دوم بهره‌مند می‌گردد. یکی از فرض‌های اصلی در مدل مذکور این است که اگر مقدار بارندگی بیش از مقدار ظرفیت زراعی خاک در لایه‌ی اول باشد، توسط فرونشست عمقی به لایه‌ی دوم منتقل می‌شود، این در حالی است که اگر میزان بارندگی نفوذ یافته از لایه‌ی اول به لایه‌ی دوم از ظرفیت نگهداری آب در لایه‌ی دوم هم بیشتر باشد نفوذ عمقی از لایه‌ی دوم رخ خواهد داد. روابط و معادلات محاسبه‌ی اجزای مختلف مدل مذکور در پژوهش Ebrahimpour et al. (2014) ارائه شده‌اند که به دلیل طولانی بودن از ذکر آن‌ها اجتناب شده است. این مدل علاوه بر داده‌های هواشناسی، به داده‌های فنولوژیک مراحل رشد، ضرایب گیاهی، مقادیر رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی و نقطه‌ی پژمردگی دائم، حداکثر عمق ریشه و رطوبت اولیه‌ی خاک نیاز دارد. در پژوهش حاضر مقدار متوسط رطوبت اولیه‌ی ناحیه‌ی ریشه برابر ۰/۱۸ درصد حجمی و رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۱۲ درصد حجمی منظور شدند Alizade and Kamali (2007). مقدار عمق توسعه ریشه گندم برابر ۱ متر و زمان رسیدن به حداکثر رشد نهایی رشد ریشه، پایان مرحله‌ی میانی در نظر گرفته شد. همچنین ضرایب مراحل مختلف رشد برای دوره‌های رشد ابتدایی، توسعه و پایانی گندم به ترتیب برابر با ۰/۲، ۱/۱ و ۰/۲۵ (Alizade and Kamali, 2007) منظور شدند. زمان کشت گندم در شهرستان‌های استان گلستان از ۱۰ آبان شروع تا ۱۰ آذر می‌باشد و

در روابط بالا  $i$  مربوط به ماه‌های سال و نماد بار روی متغیرها معرف میانگین آن‌ها می‌باشد که به عنوان نمونه متوسط تلفات برای هر ماه خاص (ماه ژانویه،  $\bar{L}_i$ ) از مجموع تلفات به ازای ماه مورد نظر طی سال‌های مختلف بر تعداد سال‌ها بدست می‌آید. بر اساس ضرایب فوق و مقادیر پتانسیلی، مقادیر بارش مناسب اقلیمی ( $\hat{P}$ ) که نشان دهنده‌ی مقدار بارش مورد نیاز برای حفظ شرایط رطوبتی خاک در وضعیت نرمال می‌باشد از رابطه‌ی ۲ برآورد می‌شود.

$$\hat{P} = \alpha_i \cdot PE + \beta_i \cdot PR + \gamma_i \cdot PRO - \delta_i \cdot PL \quad (۲)$$

با داشتن سری اطلاعات بارش واقعی ( $P$ ) و بارش مناسب اقلیمی، اختلاف بین آن‌ها برای هر ماه ( $d$ ) مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$(۳)$$

$$d = P - \hat{P} = P - [\alpha_i \cdot PE + \beta_i \cdot PR + \gamma_i \cdot PRO - \delta_i \cdot PL]$$

$$\bar{P} = ET + \bar{R} + RO - \bar{I}$$

مقادیر مختلف اختلاف بین بارش واقعی و بارش مناسب اقلیمی ( $d = P - \hat{P}$ ) به ازای هر ماه و هر مکان مختلف مفهوم مختلفی دارند که به منظور تصحیح این امر به ازای زمان‌های مختلف، مقادیر ناهنجاری‌های رطوبتی توسط فاکتور  $K_i$  که بیانگر مشخصه‌ی اقلیمی می‌باشد وزن‌دار می‌شوند. در واقع فاکتور  $K_i$  از فاکتور  $K'_i$  که خود برآوردی از مشخصه‌ی اقلیمی مکان‌های مختلف می‌باشد تعریف شده است (روابط ۴ و ۵).

$$K'_i = 1.5 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\overline{PE}_i + \overline{R}_i + \overline{RO}_i + 2.8}{\frac{\overline{P}_i + \overline{L}_i}{D_i}} \right] + 0.5 \quad (۴)$$

$$K_i = \frac{17.67}{\sum_{j=1}^{12} \overline{D}_j K'_j} K'_i \quad (۵)$$

در رابطه‌ی ۴،  $\bar{D}_i$  میانگین مقادیر مطلق  $d$  است. با محاسبه‌ی مقادیر  $K_i$  که نشان دهنده‌ی فاکتورهای وزن‌دار برای انحرافات رطوبت طی ماه‌های مختلف می‌باشند می‌توان انحرافات غیرنرمال اقلیمی را به طور نسبی با یکدیگر مقایسه کرد که بر اساس آن شاخص رطوبتی  $Z$  طی ماه‌های مختلف مطابق رابطه‌ی ۶ برآورد می‌گردد. در ادامه با استفاده از حداکثر مجموع مقادیر  $Z$  به ازای تداوم‌های مختلف معادله اولیه شدت خشکسالی استخراج و مقادیر  $Z$  تجمی به صورت طبقه‌بندی شده جهت بررسی شدت و زمان شروع و پایان رخدادها تبدیل می‌شوند. در نهایت مقادیر شاخص پالمر از رابطه ۷ بدست می‌آید.

زمان برداشت نیز از ۱۰ تا ۲۰ خرداد ماه ادامه دارد بنابراین دوره‌ی رشد با توجه به تاریخ کاشت گندم در هر شهرستان از آبان یا آذر تا خردادماه در نظر گرفته شد. با استفاده از مدل دولایه‌ی بیلان آب خاک، مقدار رطوبت لایه‌ی فعال خاک برای محصول گندم در پایان هر روز ( $MC_t$ ) برآورد و با میانگین‌گیری حسابی از رطوبت‌های روزانه، مقدار رطوبت متوسط ماهانه برای هر ماه از دوره‌ی رشد برآورد گردید. سپس به منظور استخراج شاخص رطوبت خاک (SMI) از داده‌های رطوبت ماهانه، از رابطه‌ی ۸ استفاده گردید:

زمان برداشت نیز از ۱۰ تا ۲۰ خرداد ماه ادامه دارد بنابراین دوره‌ی رشد با توجه به تاریخ کاشت گندم در هر شهرستان از آبان یا آذر تا خردادماه در نظر گرفته شد. با استفاده از مدل دولایه‌ی بیلان آب خاک، مقدار رطوبت لایه‌ی فعال خاک برای محصول گندم در پایان هر روز ( $MC_t$ ) برآورد و با میانگین‌گیری حسابی از رطوبت‌های روزانه، مقدار رطوبت متوسط ماهانه برای هر ماه از دوره‌ی رشد برآورد گردید. سپس به منظور استخراج شاخص رطوبت خاک (SMI) از داده‌های رطوبت ماهانه، از رابطه‌ی ۸ استفاده گردید:

$$SMI = \frac{(\theta_{FC} - MC_t)}{(\theta_{FC} - \theta_{PWP})} \quad (8)$$

در این رابطه  $\theta_{FC}$  رطوبت خاک در ظرفیت زراعی،  $\theta_{PWP}$  رطوبت خاک در نقطه‌ی پژمردگی دائم می‌باشند که به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۱۲ درصد حجمی (خاک با بافت متوسط) در نظر گرفته شدند.

## ۲-۶- برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ )

در این پژوهش جهت برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) در ایستگاه‌های مورد بررسی، ابتدا مقادیر آن از روش فائو پنمن-مونتیت (FPM) و ۵ روش تجربی شامل هارگریوز-سامانی، پریستلی-تیلور، مک‌کینک، تورک و فائو پنمن-مونتیت مبتنی بر داده‌های محدود (برآورد داده‌های تابش خورشیدی و سرعت باد) در سه ایستگاه سینوپتیک گرگان، گنبد کاووس و مراوه‌تپه محاسبه و با مرجع قرار دادن روش FPM به عنوان یک روش استاندارد، مقادیر آماره‌های خطا برای هریک از روش‌های تجربی برآورد گردید که بر اساس نتایج آن در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی، روش FPM مبتنی بر داده‌های محدود (Vangelis et al., 2013) دارای کمترین مقدار خطا بوده است. بنابراین از این روش برای برآورد مقادیر  $ET_0$  در ایستگاه‌های تبخیرسنجی استفاده گردید. در ایستگاه‌های سینوپتیک نیز با توجه به موجود بودن تمامی اطلاعات هواشناسی از روش فائو-پنمن-مونتیت استفاده شد. مقادیر  $ET_0$  در محاسبه‌ی شاخص‌های خشکسالی SPEI، PDSI و Z و در مدل توازن دولایه‌ی آب خاک جهت محاسبه‌ی شاخص SMI مورد استفاده قرار گرفتند.

## ۲-۷- روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) یکی از روش‌های آماری چند متغیره می‌باشد که مجموعه‌ای از متغیرهای دارای همبستگی را به مجموعه‌ای خطی متفاوت از مؤلفه‌هایی که ناهمبسته‌اند، تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر هدف از PCA، یافتن ترکیباتی از k متغیر

$$\begin{cases} Y_{i,1} = e_{11}X_{i,1} + e_{12}X_{i,2} + \dots + e_{1k}X_{i,k} \\ Y_{i,2} = e_{21}X_{i,1} + e_{22}X_{i,2} + \dots + e_{2k}X_{i,k} \\ \dots \\ Y_{i,k} = e_{k1}X_{i,1} + e_{k2}X_{i,2} + \dots + e_{kk}X_{i,k} \end{cases} \quad (9)$$

همان‌طور که بیان شد در رابطه‌ی ۹، مؤلفه‌ی  $Y_{i,1}$  بیشترین بخش واریانس، مؤلفه‌ی  $Y_{i,2}$  از باقیمانده‌ی واریانس بیشترین بخش و به همین ترتیب سایر مؤلفه‌ها بخش‌های باقیمانده‌ی واریانس را توضیح می‌دهند. تفکیک هر مؤلفه می‌تواند بر اساس ماتریس کواریانس یا همبستگی داده‌ها با  $\{e_{11}, e_{21}, \dots, e_{1k}\}$  به عنوان اولین مقادیر بردار ویژه انجام شود. هر بردار ویژه ضرایب k مؤلفه‌ی اصلی را در بردار مقدار واریانس از داده‌ها که توسط مؤلفه‌ی اول توضیح داده می‌شود مقدار ویژه برای مؤلفه اول  $\lambda_1$  و برای مؤلفه دوم  $\lambda_2$  و برای سایر مؤلفه‌ها نیز به همین شیوه تعریف می‌گردد، به طوری که  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k$  می‌باشد. برای هر مؤلفه یک مقدار ویژه وجود دارد و اندازه مقدار ویژه برای یک مؤلفه نشان دهنده اهمیت آن مؤلفه در تشریح کل تغییرات در داخل مجموعه داده‌ها است. از آنجایی که هر مقدار ویژه جزئی از کل واریانس داده‌های اصلی را که توسط هر مؤلفه برآورد می‌شود را توضیح می‌دهد سهم هر مؤلفه به صورت نسبت هر مقدار ویژه به مجموع مقادیر ویژه محاسبه می‌گردد که با در نظر گرفتن تمامی مؤلفه‌های اصلی به منظور برآورد شاخص ADI برپایه‌ی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌گردد (Yu et al., 2015; Li et al., 2015).

$$CDI_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} Y_{i,1} + \frac{\lambda_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} Y_{i,j} + \dots + \frac{\lambda_n}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} Y_{i,k} \quad (10)$$

در این پژوهش کلیه‌ی محاسبات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از بسته‌های آماری نرم‌افزار R نظیر: lattice، ellipse، cluster، FactoMineR و ade4 انجام شده است.

## ۲-۸- روش‌شناسی توسعه‌ی شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI) و ارزیابی نتایج آن

به منظور توسعه‌ی شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI)، از فلوجارت ارائه شده در پژوهش (Keyantash and Dracup, 2004) برای محاسبه‌ی شاخص مذکور در هر یک از ماه‌های دوره‌ی رشد در هر ایستگاه استفاده شد. بدین منظور ابتدا مقادیر ماهانه‌ی شاخص‌های خشکسالی SPI، SPEI، Z، PDSI و SMI در هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره‌ی آماری سال‌های زراعی ۶۱-۱۳۶۰ تا ۹۳-۱۳۹۲ محاسبه شدند. سپس با توجه به تعداد ماه‌های فصل رشد گندم در ایستگاه‌های مورد بررسی (۸ یا ۹ ماه بر اساس شروع و پایان دوره کشت) مقادیر شاخص‌های مذکور برای هر ماه طی سال‌های مختلف در قالب یک ماتریس با ابعاد مشخص (تعداد سال در تعداد ۵ شاخص مورد استفاده) مرتب گردیدند. آن‌گاه با اعمال روش PCA روی ماتریس ایجاد شده با یافتن مقادیر بردارهای ویژه برای هر سری از شاخص‌های ۵ گانه، مقادیر مؤلفه‌های اصلی از ترکیب خطی شاخص‌های ورودی در ماه مورد نظر برآورد گردیدند. با محاسبه‌ی سری‌های زمانی از مقادیر مؤلفه‌های اصلی، جهت بدست آوردن شاخص ADI و تعیین بازه‌های طبقه‌های مختلف رطوبتی به شرح زیر اقدام گردید: ابتدا مقادیر تابع احتمال تجمعی به ازای مقادیر ADI بدست آمده از ترکیب خطی مؤلفه‌های ایجاد شده با برازش تابع توزیع GEV بر آن‌ها محاسبه و سپس به شیوه‌ی معکوس مقدار متناظر با احتمال تجمعی مذکور در توزیع نرمال استاندارد شده تعیین می‌گردد که به عنوان مقادیر نهایی شاخص ADI منظور گردیدند. با توجه به این که شاخص ADI نیز یک شاخص استاندارد شده می‌باشد، طبقه‌بندی وضعیت‌های مختلف رطوبتی در این شاخص نیز مشابه شاخص SPI در نظر گرفته شدند که بر اساس آن دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار شاخص ADI به‌طور مستمر منفی و به مقدار -۱ یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار شاخص ADI مثبت گردد. (Keyantash and Dracup, 2004) به منظور یافتن مقادیر طبقه‌های مختلف خشکسالی در این شاخص، پیشنهاد نمودند با یافتن احتمال تجمعی مقادیر حاصل از ترکیب خطی متغیرهای اصلی در مؤلفه‌ی اول، مقادیر ۲، ۷، ۱۶ و ۸۴ درصد احتمال به عنوان مقادیر طبقه‌های خشکسالی بسیار شدید، شدید، متوسط و نرمال در نظر گرفته شوند و به شیوه‌ی معکوس مقدار متناظر با احتمال‌های تجمعی مذکور در توزیع نرمال استاندارد شده تعیین گردد. در این پژوهش نیز مطابق روش ارائه شده با یافتن مقادیر درصد احتمال تجمعی به ازای تابع توزیع GEV به شیوه‌ی معکوس مقادیر متناظر

با احتمال‌های تجمعی مذکور در توزیع نرمال استاندارد شده برآورد و به عنوان مقادیر نهایی شاخص ADI منظور شدند. تفسیر مقادیر بدست آمده از شاخص ADI مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط (McKee et al., 1993) برای شاخص SPI می‌باشد.

به منظور ارزیابی نتایج شاخص توسعه داده شده‌ی ADI، از نتایج شاخص SPEI به عنوان یک شاخص نسبتاً جدید و پرکاربرد استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پایش خشکسالی که کاربرد زیادی نیز دارند، در این امر نهفته است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی و کمبود آب داراست (Vicente-Serrano et al., 2010) و برخلاف شاخص SPI با مشکل برازش تابع احتمال بر داده‌های صفر در مناطق خشک و ماه‌های خشک روبه‌رو نمی‌باشد (Stagge et al., 2015). از طرفی با توجه به این که دامنه و طبقات مختلف رطوبتی در دو شاخص مذکور یکسان می‌باشد، نتایج شاخص ADI با آن مورد مقایسه و بررسی واقع شده‌اند. اگرچه مدت زمان کمی از توسعه‌ی شاخص SPEI می‌گذرد اما با این وجود، این شاخص به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف تحلیل تغییرات مکانی خشکسالی، پایش خشکسالی، پیش‌بینی خشکسالی، تغییر اقلیم و شناسایی اثرات خشکسالی در بخش‌های مختلف هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و سیستم‌های اکولوژیک استفاده شده است (Beguería et al., 2014). هم‌چنین برای نمایش نتایج همبستگی بر مبنای آماری کندال-تاو ( $\tau_n$ ) بین شاخص ADI با شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه‌های مورد بررسی طی ماه‌های مختلف سال از نمودار Spider Plot استفاده شد. ضریب همبستگی  $\tau_n$  یک اندازه وابستگی ناپارامتری است که با توجه به مشاهدات مقدار آن را از رابطه‌ی ۱۱ برآورد می‌گردد:

$$\tau_n = \left( \frac{n}{2} \right)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (11)$$

در این رابطه،  $\text{sign}(x)$  تابع علامت است اگر مقدار عبارت  $(x_i - x_j)(y_i - y_j)$  بزرگ‌تر از صفر باشد آن‌گاه  $\text{sign}$  برابر یک و اگر مقدار عبارت  $(x_i - x_j)(y_i - y_j)$  کوچک‌تر از صفر باشد آن‌گاه  $\text{sign}$  برابر -۱ می‌باشد و  $i, j = 1, 2, \dots, n$  می‌باشد که  $n$  برابر تعداد داده‌های مشاهداتی است (Genest and Favre, 2007).



### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمون‌های همگنی

دارای سهم کمتری در توضیح واریانس باقیمانده می‌باشند. با توجه به این‌که، انتخاب تعداد مؤلفه‌های لازم بستگی به واریانس برآورد شده توسط هر مؤلفه و واریانس تجمعی مؤلفه‌ها دارد، می‌توان با انتخاب سطح مشخصی مثلاً ۹۵ درصد تعداد مؤلفه‌هایی که مقدار واریانس مذکور را برآورد می‌نمایند انتخاب نمود. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای شاخص‌ها و متغیرهای خشکسالی مورد استفاده در ایستگاه‌های مورد بررسی شامل درصد هر مؤلفه از توضیح واریانس و مجموع واریانس تبیین شده برای سه مؤلفه‌ی اول طی ماه‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده مؤلفه‌ی اول در تمامی ماه‌ها برای ایستگاه‌های مورد پایش نزدیک به ۶۰ درصد واریانس را برآورد می‌نماید که سهم نسبتاً بالایی را شامل می‌شود و مجموع واریانس تجمعی سه مؤلفه‌ی اول بیش از ۹۰ درصد و در بیشتر موارد بیش از ۹۵ درصد واریانس را توضیح می‌دهند که نشان می‌دهد می‌توان با انتخاب سه مؤلفه‌ی اول با اطمینان زیادی بیان داشت که مؤلفه‌های ایجاد شده قادر به برآورد ویژگی‌های متغیرهای اصلی می‌باشند. در این پژوهش جهت اطمینان بیشتر از تمامی مؤلفه‌های ایجاد شده مطابق با رابطه‌ی ۱۰ توسعه‌ی شاخص خشکسالی ADI استفاده شده است.

همان‌گونه که ذکر شد، برای انجام آزمون همگنی از آزمون‌های ارائه شده در بسته‌ی iki.dataclim در نرم‌افزار R به صورت ترکیبی استفاده شده است. در جدول ۳ نتایج آزمون همگنی با استفاده از ۴ آزمون نرمال استاندارد شده (SNH)، دامنه‌ی بیشاند (BHR)، پیت (PET) و نسبت ون- نیومن (VON) برای متغیر بارش سالانه (بیشتر از آستانه‌ی ۱ میلی‌متر) در هر ایستگاه انجام شده است. در جدول مذکور P1 نشان دهنده‌ی معنی‌داری در سطح ۱ درصد، P5 نشان دهنده‌ی معنی‌داری در سطح ۵ درصد و NS نشانگر عدم معنی‌داری است. برای هر متغیر اگر بیش از ۱ آزمون دارای نشانگر P1 نباشد داده‌ها از نظر همگنی مناسب (useful) و اگر ۲ آزمون دارای نشانگر P1 باشند داده‌ها از نظر همگنی شک‌برانگیز (doubtful) و اگر ۳ یا بیشتر آزمون دارای نشانگر P1 باشند داده‌ها از نظر همگنی مشکوک (suspect) تلقی می‌شوند. بر پایه‌ی نتایج بدست آمده در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه مینودشت داده‌های بارش در کلاس مناسب (شک‌برانگیز) قرار گرفتند که بیانگر همگنی داده‌های بارش و قابلیت استفاده در تحلیل‌های بعدی می‌باشند.

#### ۳-۲- نتایج پایش خشکسالی بر اساس شاخص تجمعی خشکسالی (ADI)

در ادامه مطابق آنچه در بخش مواد و روش‌ها در ارتباط با روش توسعه‌ی شاخص ADI آورده شد مقادیر ماهانه‌ی آن برای ایستگاه‌های مورد بررسی استخراج شد که نتایج پایش وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص مذکور در شکل ۱ آورده شدند. هم‌چنین به منظور مقایسه‌ی تطبیقی نتایج آن، مقادیر شاخص SPEI نیز در نمودارهای مربوطه ترسیم شدند.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، روش PCA به تعداد متغیرهای اصلی (در این پژوهش ۵ شاخص خشکسالی ورودی)، مؤلفه‌ی اصلی ایجاد می‌نماید که هر مؤلفه سهم مشخصی از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کند به طوری که مؤلفه‌ی اول بیشترین و مؤلفه‌های دوم و سوم

Table 3. Comparing the results of homogeneity tests for precipitation in selected stations

جدول ۳- نتایج بررسی همگنی داده‌های بارش در ایستگاه‌های مورد بررسی

| Station        | Homogeneity classes | SNH | BHR | PET | VON |
|----------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| Aq-qala        | Useful              | NS  | NS  | NS  | NS  |
| Sad Gorgan     | Useful              | NS  | NS  | NS  | NS  |
| Behlake Dashli | Useful              | NS  | NS  | NS  | NS  |
| Gafar Haji     | Useful              | NS  | NS  | NS  | NS  |
| Ramiyan        | Useful              | NS  | p5  | NS  | p5  |
| Fazel Abad     | Useful              | p5  | p5  | p5  | p5  |
| Tamar          | Useful              | NS  | NS  | NS  | NS  |
| Marave Tapeh   | Useful              | NS  | NS  | NS  | NS  |
| Gorgan         | Useful              | p5  | NS  | NS  | p5  |
| Araz koseh     | Useful              | NS  | NS  | NS  | p5  |
| Minudasht      | Doubtful            | NS  | p1  | NS  | p1  |

Significant at the 5% level (p5), Significant at the 1% level (p1) and none significant (NS)

**Table 4. The portion of each component in total variance of original data in given stations**  
**جدول ۴- نتایج سهم هریک از مؤلفه‌های تعیین شده از واریانس داده‌های اصلی در ایستگاه‌های مورد بررسی**

| Stations   | Variance portion | Months of growth season |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            |                  | Nov.                    | Dec.  | Jan.  | Feb.  | Mar.  | Apr.  | May.  | Jun.  |
| Aq-Qala    | Comp. 1          | 0.664                   | 0.644 | 0.557 | 0.665 | 0.502 | 0.535 | 0.537 | 0.442 |
|            | Comp. 2          | 0.215                   | 0.233 | 0.304 | 0.222 | 0.361 | 0.328 | 0.296 | 0.344 |
|            | Comp. 3          | 0.064                   | 0.088 | 0.100 | 0.081 | 0.082 | 0.077 | 0.099 | 0.102 |
|            | Total            | 0.943                   | 0.965 | 0.960 | 0.967 | 0.945 | 0.939 | 0.932 | 0.869 |
| Sad Gorgan | Comp. 1          | 0.731                   | 0.685 | 0.746 | 0.743 | 0.687 | 0.677 | 0.630 | 0.465 |
|            | Comp. 2          | 0.163                   | 0.190 | 0.116 | 0.150 | 0.192 | 0.193 | 0.219 | 0.374 |
|            | Comp. 3          | 0.061                   | 0.073 | 0.096 | 0.079 | 0.084 | 0.082 | 0.092 | 0.066 |
|            | Total            | 0.955                   | 0.948 | 0.958 | 0.973 | 0.954 | 0.952 | 0.941 | 0.905 |
| Fazel Abad | Comp. 1          | -                       | 0.813 | 0.785 | 0.801 | 0.751 | 0.801 | 0.705 | 0.526 |
|            | Comp. 2          | -                       | 0.112 | 0.113 | 0.112 | 0.123 | 0.129 | 0.202 | 0.346 |
|            | Comp. 3          | -                       | 0.071 | 0.096 | 0.079 | 0.105 | 0.060 | 0.057 | 0.088 |
|            | Total            | -                       | 0.996 | 0.994 | 0.992 | 0.979 | 0.989 | 0.964 | 0.960 |
| Gafar Haji | Comp. 1          | 0.827                   | 0.832 | 0.765 | 0.820 | 0.729 | 0.704 | 0.608 | 0.608 |
|            | Comp. 2          | 0.093                   | 0.114 | 0.146 | 0.89  | 0.204 | 0.229 | 0.271 | 0.271 |
|            | Comp. 3          | 0.045                   | 0.049 | 0.075 | 0.080 | 0.051 | 0.38  | 0.064 | 0.064 |
|            | Total            | 0.965                   | 0.995 | 0.986 | 0.989 | 0.984 | 0.971 | 0.943 | 0.943 |
| Araz Koseh | Comp. 1          | 0.825                   | 0.844 | 0.800 | 0.840 | 0.751 | 0.680 | 0.714 | 0.637 |
|            | Comp. 2          | 0.109                   | 0.097 | 0.137 | 0.095 | 0.182 | 0.228 | 0.206 | 0.224 |
|            | Comp. 3          | 0.030                   | 0.049 | 0.050 | 0.051 | 0.045 | 0.051 | 0.048 | 0.062 |
|            | Total            | 0.963                   | 0.989 | 0.987 | 0.986 | 0.978 | 0.959 | 0.969 | 0.923 |
| Gorgan     | Comp. 1          | -                       | 0.537 | 0.748 | 0.794 | 0.729 | 0.762 | 0.640 | 0.536 |
|            | Comp. 2          | -                       | 0.200 | 0.145 | 0.118 | 0.157 | 0.152 | 0.259 | 0.297 |
|            | Comp. 3          | -                       | 0.161 | 0.097 | 0.080 | 0.095 | 0.063 | 0.061 | 0.071 |
|            | Total            | -                       | 0.898 | 0.990 | 0.992 | 0.980 | 0.978 | 0.961 | 0.904 |
| Tamar      | Comp. 1          | -                       | 0.797 | 0.805 | 0.805 | 0.809 | 0.804 | 0.743 | 0.614 |
|            | Comp. 2          | -                       | 0.135 | 0.105 | 0.107 | 0.119 | 0.105 | 0.204 | 0.281 |
|            | Comp. 3          | -                       | 0.064 | 0.078 | 0.078 | 0.065 | 0.063 | 0.027 | 0.084 |
|            | Total            | -                       | 0.995 | 0.988 | 0.991 | 0.993 | 0.971 | 0.974 | 0.944 |
| Minudasht  | Comp. 1          | 0.601                   | 0.601 | 0.816 | 0.776 | 0.844 | 0.819 | 0.829 | 0.714 |
|            | Comp. 2          | 0.290                   | 0.110 | 0.134 | 0.091 | 0.106 | 0.080 | 0.191 | 0.350 |
|            | Comp. 3          | 0.086                   | 0.066 | 0.082 | 0.057 | 0.066 | 0.069 | 0.061 | 0.101 |
|            | Total            | 0.977                   | 0.992 | 0.991 | 0.992 | 0.990 | 0.978 | 0.967 | 0.924 |
| Ramiyan    | Comp. 1          | 0.651                   | 0.784 | 0.804 | 0.802 | 0.764 | 0.729 | 0.729 | 0.500 |
|            | Comp. 2          | 0.210                   | 0.096 | 0.113 | 0.133 | 0.136 | 0.183 | 0.171 | 0.327 |
|            | Comp. 3          | 0.104                   | 0.089 | 0.078 | 0.059 | 0.093 | 0.062 | 0.054 | 0.116 |
|            | Total            | 0.956                   | 0.969 | 0.995 | 0.994 | 0.994 | 0.984 | 0.964 | 0.942 |

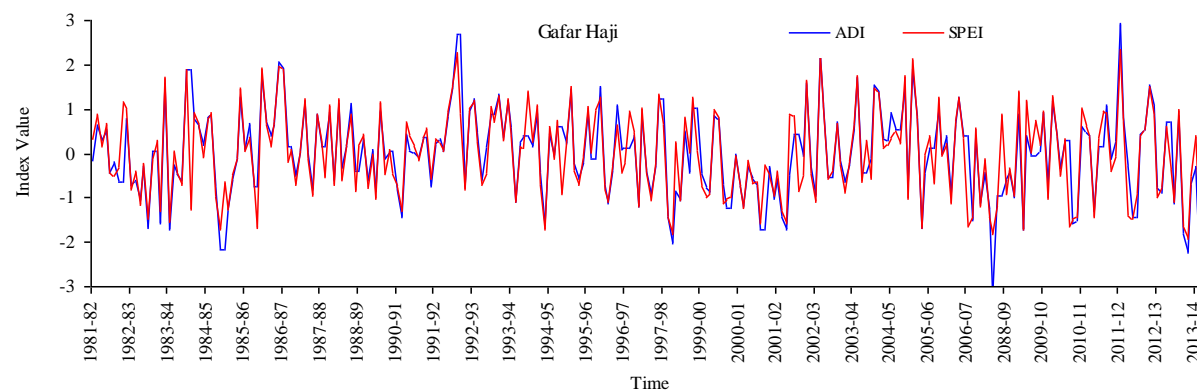
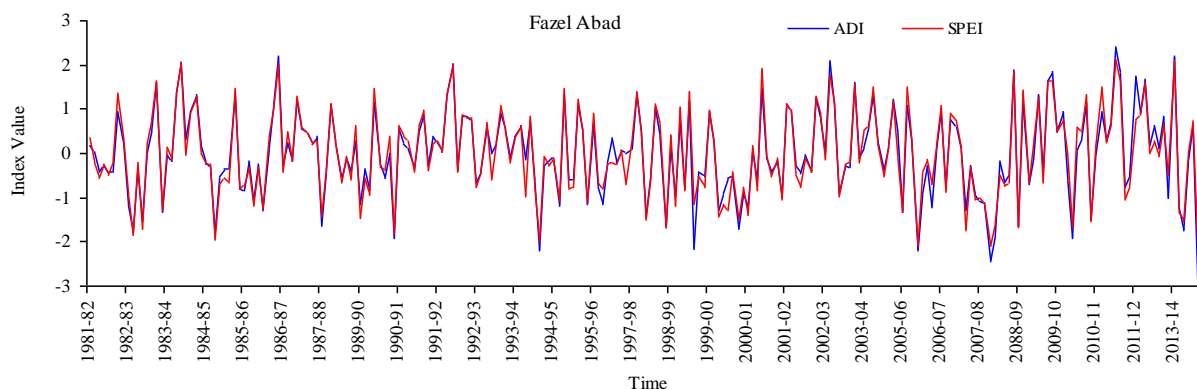
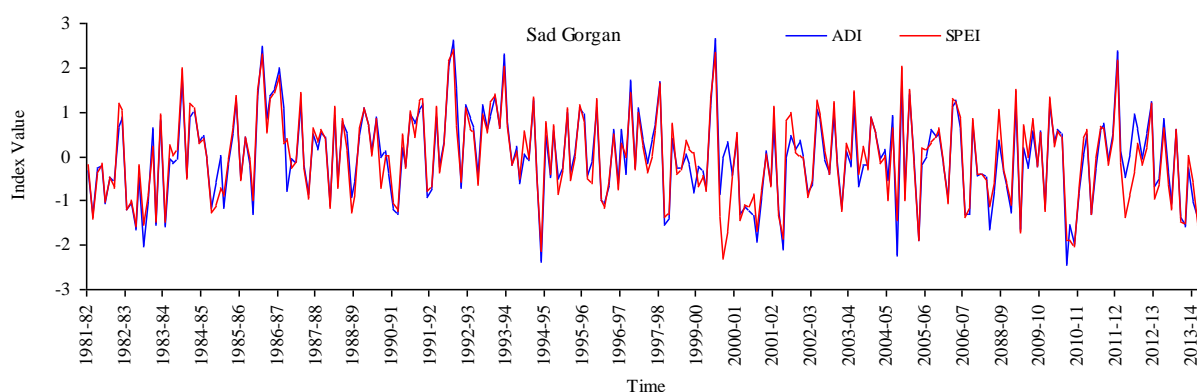
که تقریباً مقادیر فراوانی بدست آمده با طبقات مختلف مورد انتظار بر اساس یک شاخص نرمال استاندارد شده مطابقت دارند.

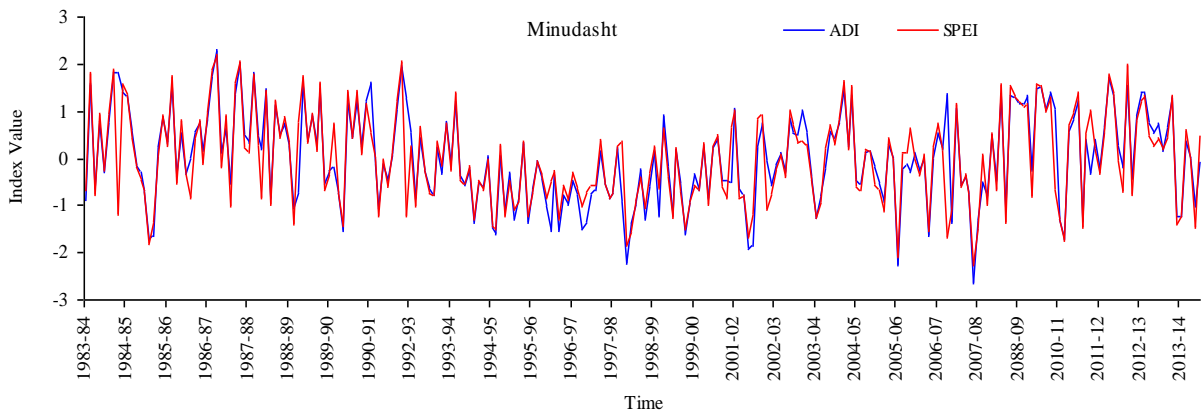
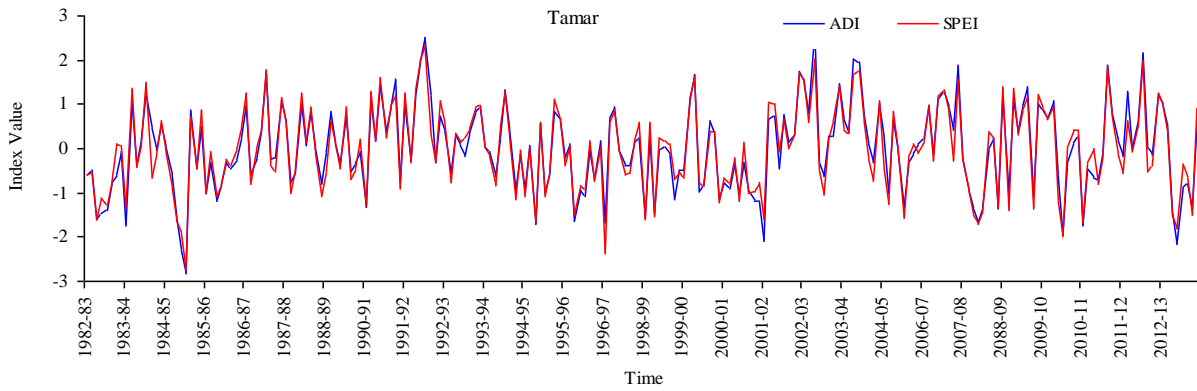
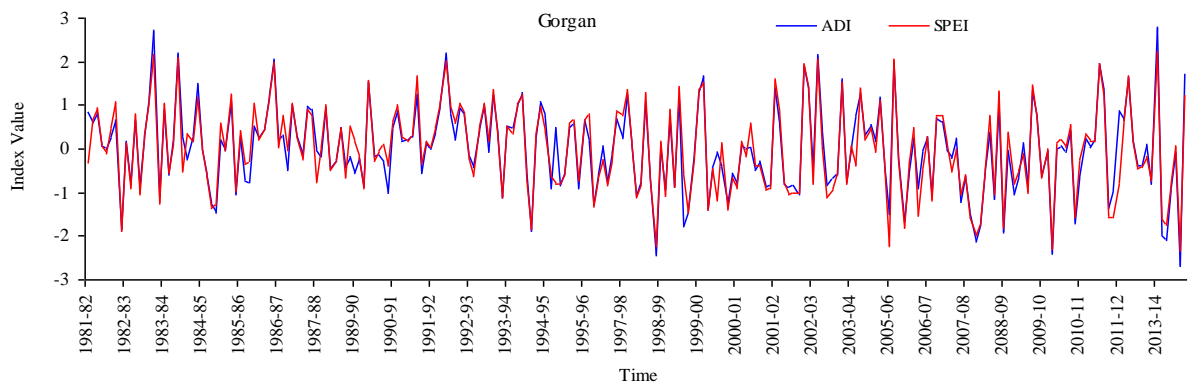
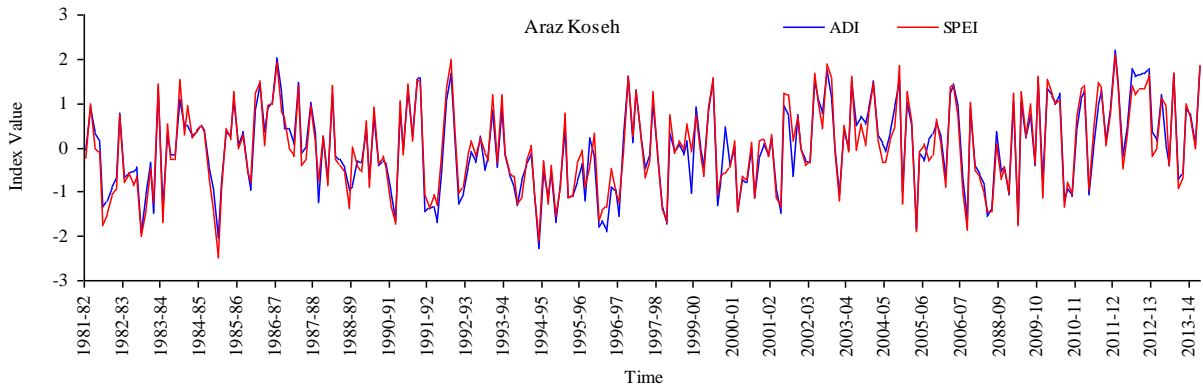
در ادامه به منظور بررسی روند این تغییرات طی ماه‌های مختلف، مقدار ضریب همبستگی شاخص ADI و شاخص‌های SPI و SPEI بر پایه‌ی آماره‌ی کندال-تاو ( $\tau_n$ ) محاسبه و نتایج به صورت نمودارهای Spider Plot برای هریک از ماه‌های دوره‌ی کشت گندم در ایستگاه‌های مورد بررسی ترسیم شدند که نتایج آن در شکل ۲

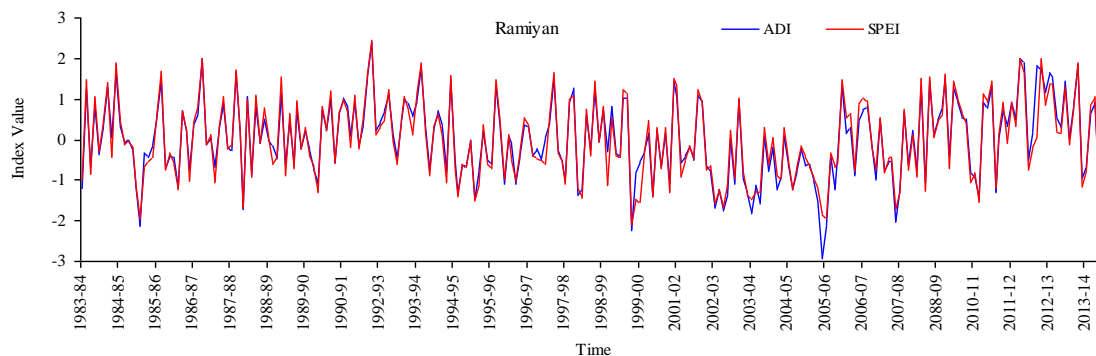
بر پایه‌ی نتایج بدست آمده شاخص ADI تقریباً در بیشتر ماه‌های سال دارای مشابهت رفتاری در تعیین وقایع رطوبتی با شاخص SPEI می‌باشد هرچند در برخی از ماه‌ها شدت وقایع رطوبتی بدست آمده توسط شاخص ADI بیشتر برآورد شده‌اند. به بیان دیگر در شناسایی وقایع حدی رطوبتی در برخی از ماه‌ها شاخص ADI شدت خشکسالی را منفی‌تر و شدت ترسالی را مثبت‌تر شناسایی نموده است. نتایج فراوانی طبقات مختلف رطوبتی استخراج شده به ازای شاخص ADI در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۵ ارائه شدند

همبستگی  $\tau_n$  شاخص ADI با شاخص SPEI در ایستگاه رامیان به عنوان یک ایستگاه پربارش طی ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد که ضریب مذکور طی ماه‌های آذر تا اردیبهشت مقادیر بیش از  $0/9$  را داراست و به ازای ماه‌های اردیبهشت، خرداد و آبان مقدار آن نیز بالاتر از  $0/8$  می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق بالا و مشابهت رفتاری شاخص‌های مذکور در نواحی و ماه‌های مرطوب می‌باشد.

نشان داده شده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده مقادیر ضریب  $\tau_n$  میان شاخص ADI و شاخص‌های SPI و SPEI طی ماه‌های مرطوب سال از آذر تا اسفند در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی بسیار بالا و تقریباً نزدیک به  $0/8$  و بیشتر می‌باشند و از مقدار این آماره طی ماه‌های کم بارش سال شامل فروردین تا خرداد کاسته شده به طوری که طی ماه خرداد در برخی از ایستگاه‌ها مقادیر ضریب همبستگی  $\tau_n$  منفی نیز مشاهده شده است. بررسی ضریب



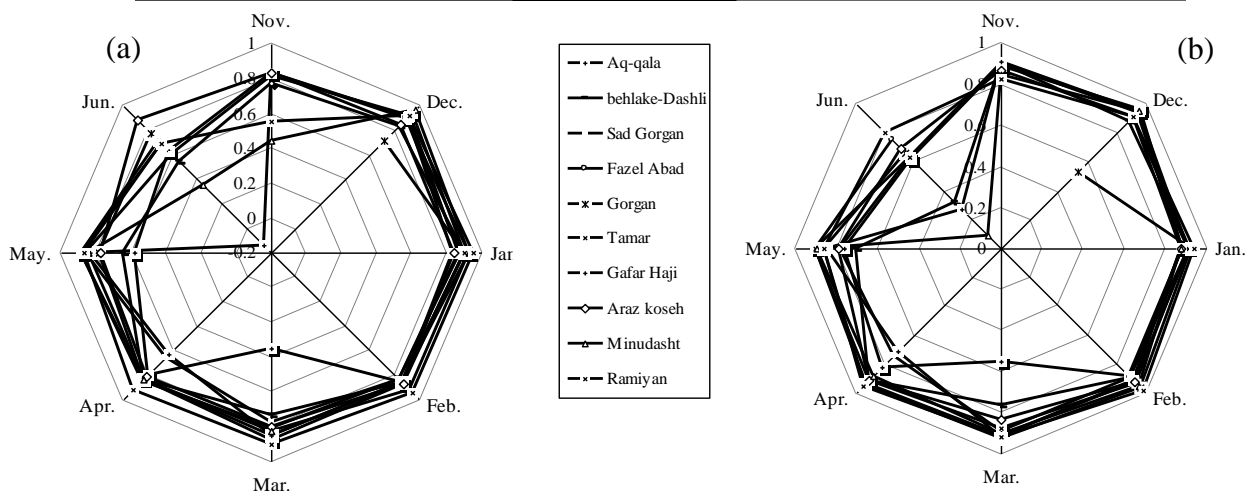




**Fig. 1- Comparison between ADI and SPEI monthly time series at selected stations**  
 شکل ۱- نتایج پایش ماهانه وضعیت رطوبتی بر اساس شاخص ADI و مقایسه نتایج آن با شاخص SPEI در ایستگاههای مورد بررسی

**Table 5- The frequency of moisture categories based on ADI at selected stations**  
 جدول ۵- نتایج فراوانی طبقه‌های مختلف رطوبتی بر اساس شاخص ADI در ایستگاههای مورد بررسی

| Stations        | Frequency of moisture category |       |          |        |          |       |         |
|-----------------|--------------------------------|-------|----------|--------|----------|-------|---------|
|                 | Extreme                        | Sever | Moderate | Normal | Moderate | Sever | Extreme |
|                 | Dry                            | Dry   | Dry      |        | Wet      | Wet   | Wet     |
| Aq-qala         | 4                              | 10    | 29       | 170    | 29       | 11    | 3       |
| Sad Gorgan      | 5                              | 11    | 28       | 179    | 27       | 6     | 7       |
| Behlake -Dashli | 2                              | 16    | 22       | 181    | 27       | 10    | 6       |
| Gafar Haji      | 5                              | 14    | 22       | 187    | 19       | 10    | 7       |
| Ramiyan         | 5                              | 6     | 27       | 171    | 23       | 15    | 1       |
| Fazel Abad      | 5                              | 12    | 16       | 158    | 26       | 8     | 6       |
| Tamar           | 4                              | 10    | 21       | 154    | 23       | 8     | 4       |
| Gorgan          | 6                              | 8     | 18       | 164    | 21       | 7     | 7       |
| Araz koseh      | 2                              | 13    | 29       | 172    | 28       | 18    | 2       |
| Minudasht       | 3                              | 11    | 23       | 164    | 34       | 11    | 2       |



**Fig. 2- The spider chart of correlation coefficient between ADI and SPI (a) and SPEI (b) in various months at selected stations**

شکل ۲- نتایج ضریب همبستگی شاخص ADI با شاخص‌های SPI (a) و SPEI (b) در ماه‌های مختلف در ایستگاههای مورد بررسی

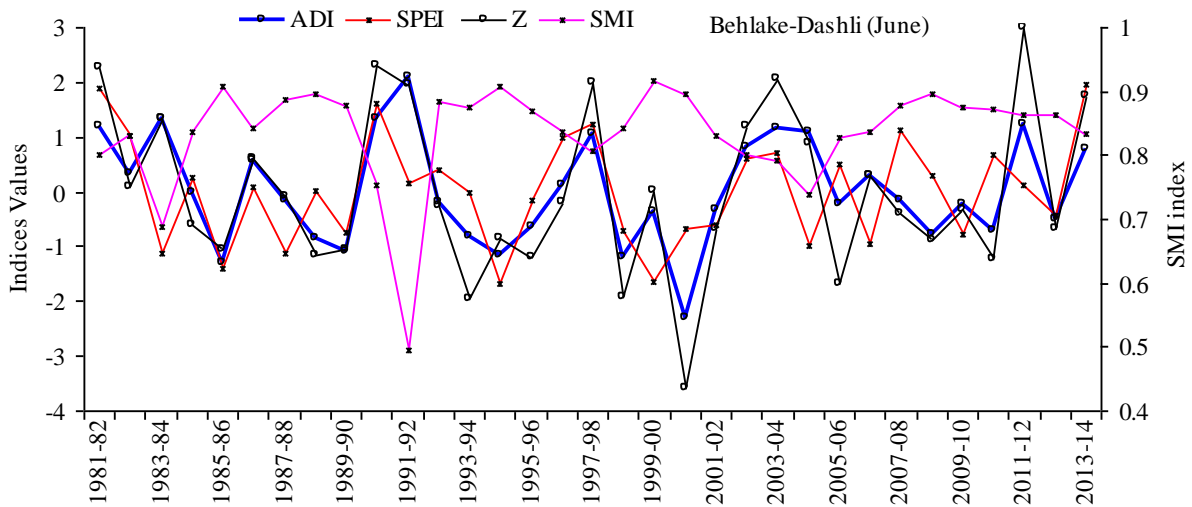
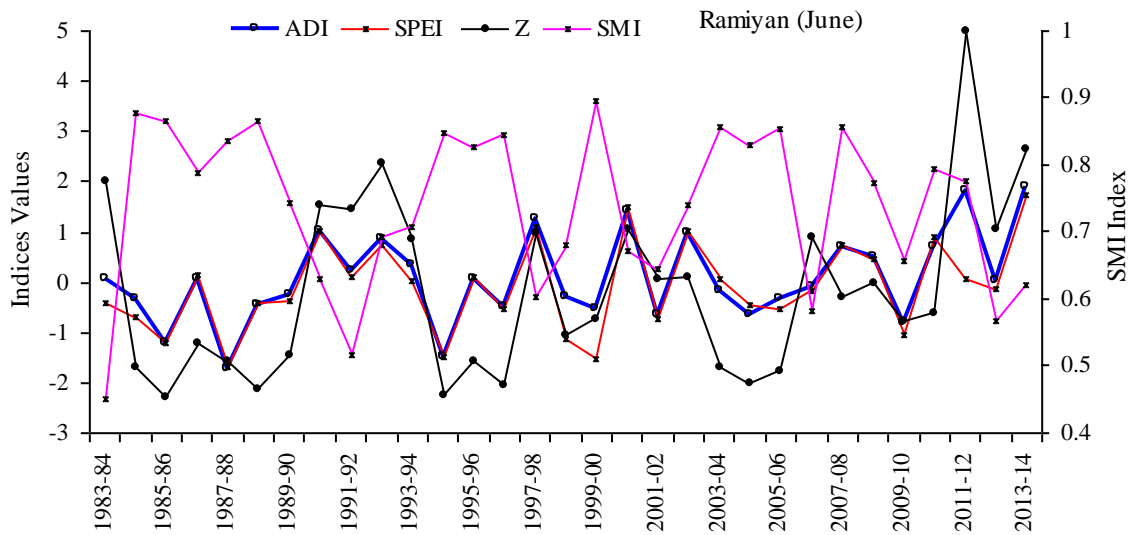
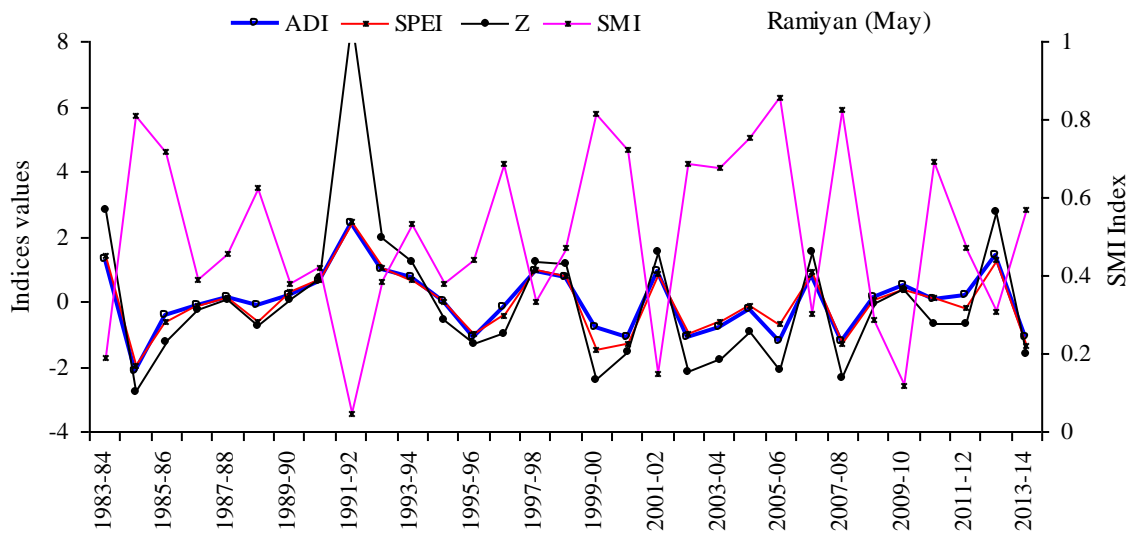
### ۳-۳- نتایج مقایسه تطبیقی شاخص ADI با سایر شاخص‌ها

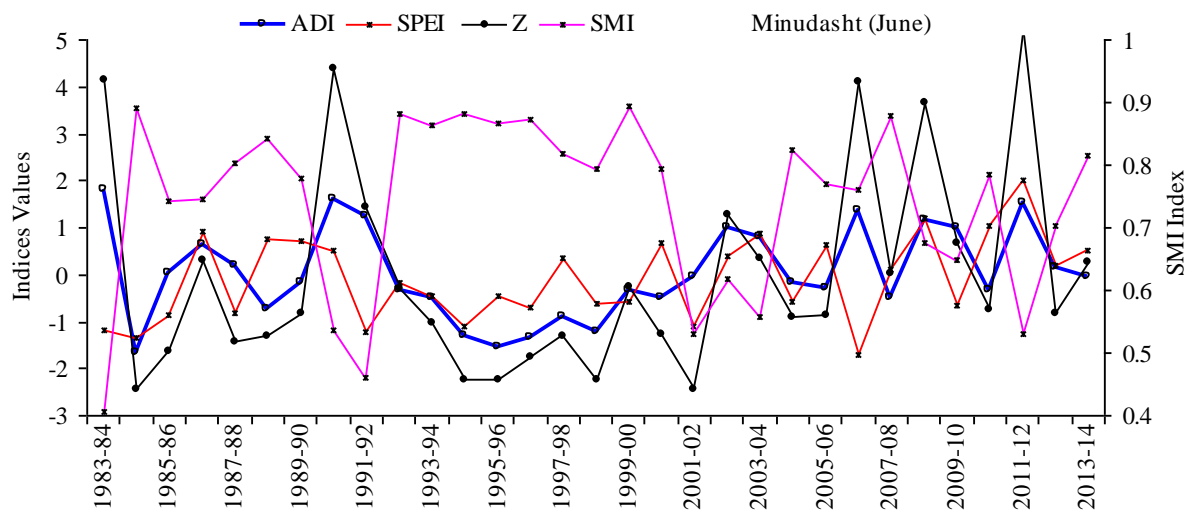
در ادامه بررسی دقیق و تطبیقی نتایج شاخص ADI به عنوان یک شاخص تجمیعی طی ماه‌های خشک سال (که نتایج آن در برخی از ماه‌ها با نتایج شاخص SPEI در یافتن مقادیر رطوبتی و یا طبقه‌های مختلف رطوبتی تفاوت دارد) انجام شده است. بدین منظور نتایج شاخص ADI در مقابل نتایج شاخص‌های SPEI، Z و SMI به عنوان شاخص‌های خشکسالی ورودی در ایستگاه‌های بهلکه-داشلی (ماه خرداد)، مینودشت (ماه خرداد) و رامیان (ماه‌های اردیبهشت و خرداد) در شکل ۳ رسم و به پایش وضعیت رطوبتی و علل اختلاف‌ها در آن‌ها پرداخته شده است تا مزایای شاخص ADI به عنوان یک شاخص تجمیعی خشکسالی که قادر به نشان دادن اثرات شاخص‌های خشکسالی ورودی در پایش نهایی می‌باشد مورد بحث و بررسی قرار گیرد. بر پایه‌ی نتایج بدست آمده از شکل ۳، در ایستگاه رامیان طی ماه اردیبهشت نتایج شاخص‌های SPEI و ADI تقریباً مشابهت زیادی در رفتار و یافتن مقادیر رطوبتی دارند. ایستگاه رامیان به عنوان پر بارش‌ترین ایستگاه مورد بررسی با بارش سالانه‌ی بیش از ۸۰۰ میلی‌متر در جنوب شرقی استان گلستان و در ناحیه‌ی نزدیک به کوهپایه‌های جنگلی قرار دارد. شدیدترین ترسالی به ازای ماه اردیبهشت، در سال ۷۱-۱۳۷۰ رخ داده است که هردو شاخص ADI و SPEI آن را به درستی تشخیص دادند این در حالی است که مقدار شاخص SMI طی سال مذکور به کمترین مقدار خود رسیده است که بیانگر رطوبت مناسب ناحیه‌ی ریشه است و همچنین شاخص Z نیز با بیشترین مقدار عددی، وضعیت ترسالی بسیار شدید را نشان داده است. به طور کلی نتایج ماه مذکور در ایستگاه رامیان در تطابق با مشابهت رفتاری نتایج شاخص‌های ADI و SPEI در نواحی و ماه‌های مرطوب می‌باشد که بیشتر نیز بدست آمده بود. بررسی نتایج ایستگاه رامیان طی ماه خرداد نیز نشان دهنده‌ی تطابق زیاد نتایج شاخص ADI و SPEI و همخوانی داده‌های شاخص SMI و Z با نتایج بدست آمده می‌باشد. در ایستگاه بهلکه-داشلی طی ماه خرداد علیرغم همخوانی نتایج شاخص ADI با SPEI در بیشتر ماه‌ها، اما در برخی از موارد اختلاف‌های معنی‌داری دیده می‌شود که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود: مقدار شاخص ADI طی ماه اردیبهشت سال ۷۱-۱۳۷۰ برابر ۱/۲۵ بدست آمد در حالی که مقدار متناظر در شاخص SPEI برابر ۱/۲۳- بدست آمد. در بررسی این امر باید بیان داشت که طی سال مذکور نقش شاخص SMI بسیار حائز اهمیت می‌باشد به طوری که مقدار این شاخص به کمترین مقدار خود رسیده است که نشانگر شرایط مرطوب در ناحیه ریشه می‌باشد و این امر سبب شده است شاخص تجمیعی خشکسالی (ADI) با

منظور نمودن نقش رطوبت خاک، وضعیت رطوبتی سال مذکور را به طور جامع‌تری با در نظر گرفتن اثرات رطوبتی خاک در کنار متغیرهای تبخیر و تعرق و بارش پایش نماید. بررسی تغییرات شاخص رطوبتی خاک در ماه خرداد در ایستگاه بهلکه-داشلی و میزان ارتباط آن با شاخص ADI نشان می‌دهد که تغییرپذیری شاخص ADI با دو نقطه‌ی کمینه و بیشینه در مقادیر شاخص SMI به طور آشکاری در ارتباط می‌باشند به طوری که در سال‌های ۷۱-۱۳۷۰ و ۷۹-۱۳۷۸ که به ترتیب بیشینه و کمینه مقادیر شاخص SMI بدست آمدند مقدار شاخص ADI به ترتیب دارای شدیدترین مقادیر ترسالی و خشکسالی بوده است. بررسی ارتباط مقادیر شاخص ADI و SPEI در ماه خرداد در ایستگاه مینودشت نشان می‌دهد که ضریب همبستگی برابر با ۰/۱ می‌باشد که نشانگر ارتباط ضعیف دو شاخص با یکدیگر می‌باشد و در برخی از سال‌ها طی ماه مذکور اختلاف دو شاخص معنی‌دار می‌باشد. به طور مثال مقدار شاخص‌های ADI و SPEI در سال زراعی ۶۳-۱۳۶۲ به ترتیب برابر ۱/۸ و ۱/۱۸- بدست آمدند. همچنین در سال زراعی ۷۱-۱۳۷۰ مقدار شاخص‌های مذکور به ترتیب برابر ۱/۳۶ و ۱/۶۹- بدست آمدند. هر دو مورد نشان‌دهنده‌ی این امر است که نتایج دو شاخص اختلاف زیادی در مقدار و طبقه‌ی رطوبتی با یکدیگر دارند. بررسی نمودار شاخص SMI طی سال‌های ذکر شده نشان می‌دهد که مقدار شاخص SMI در هر دو سال دارای کمترین مقدار شاخص رطوبتی بوده است، از طرفی رفتار شاخص Z طی سال‌های مذکور در ماه خرداد نیز نشان می‌دهد این شاخص دارای مقادیر مثبت بیشینه‌ای بوده است که در زمهره‌ی ترسالی‌های شدید قرار می‌گیرند. بنابر آنچه ذکر شد تنش کم ناحیه‌ی رطوبتی و مقادیر بالای شاخص Z سال‌های ۶۳-۱۳۶۲ و ۷۱-۱۳۷۰ در ماه خرداد به مقادیر ۱/۸ و ۱/۳۶ که در دسته‌ی ترسالی‌های شدید و متوسط می‌باشند قرار گیرند این در حالی است که نتایج شاخص SPEI مقادیر خشکسالی متوسط و شدید را برآورد کرده‌اند.

### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

به منظور توسعه‌ی شاخص تجمیعی خشکسالی مبتنی بر روش PCA با محاسبه‌ی ۵ شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شاخص Z (مشتق شده از شاخص پالمر)، شاخص خشکسالی پالمر (PDSI) و شاخص رطوبت خاک (SMI)، شاخص ADI از ترکیب خطی مؤلفه‌های ایجاد شده توسعه و برای پایش خشکسالی کشاورزی در استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت که مهم‌ترین نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:





**Fig. 3- The comparative results of ADI index with SPEI, SMI, and Z Indices in dry months at given stations**  
 شکل ۳- مقایسه تطبیقی نتایج شاخص ADI با شاخص های SPEI، SMI و Z در ماه های خشک

نماید فراهم می‌سازد که نتایج این پژوهش در تأیید توانمندی ساختار شاخص خشکسالی تجمیعی مبتنی بر تجزیه به مؤلفه‌های اصلی توسعه داده شده توسط Keyantash and Dracup (2004) با نتایج پژوهش‌های مختلف نظیر Yu et al. (2015)، Li et al. (2015) و Bazrafshan et al. (2015) مطابقت دارد. از طرف دیگر در دو دهه‌ی گذشته بیشتر پژوهش‌های انجام شده به منظور پایش وضعیت‌های رطوبتی در استان گلستان تنها بر مبنای داده‌های بارش و عمدتاً شاخص SPI انجام شده‌اند (Bazrafshan et al., 2011; Mosaedi et al., 2010) که بررسی نتایج همبستگی شاخص ADI با شاخص SPI در این پژوهش نشان داد اگرچه در بیشتر ماه‌های سال دو شاخص دارای مشابهت رفتاری و ضرایب همبستگی بالایی طی ماه‌های مرطوب بودند اما در ماه‌های پایانی دوره‌ی رشد به ویژه ماه‌های خرداد و اردیبهشت در برخی از ایستگاه‌ها مقادیر کم و گاه منفی همبستگی مشاهده شد که نشان دهنده‌ی اهمیت پایش خشکسالی کشاورزی با در نظر گرفتن سایر متغیرهای مؤثر بر آن طی ماه‌های مذکور نظیر رطوبت خاک و تفاوت بارش از بارش مناسب اقلیمی در شاخص‌های Z و پالمر می‌باشد.

### پی‌نوشت‌ها

- 1- Principal Components Analysis
- 2- Aggregate Drought Index
- 3- Kernel Entropy Component Analysis

بررسی مقایسه‌ی نتایج شاخص ADI با شاخص SPEI به عنوان یک شاخص پرکاربرد و مناسب در سطح استان گلستان نشان داد که همبستگی بسیار بالایی در نواحی مرطوب و ماه‌های مرطوب سال بین این دو شاخص وجود دارد به طوری که مقدار آماره‌ی کندال تاو مقادیری بیش از ۰/۸ را بدست داد و با افزایش درجه حرارت و کاهش بارندگی از مقدار همبستگی در نواحی خشک و ماه‌های خشک کاسته می‌شود.

بررسی تطبیقی نتایج شاخص ADI با شاخص‌های ورودی در نظر گرفته شده در ماه‌های خشک سال نظیر اردیبهشت و خرداد در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داد که نتایج شاخص SPEI به تنهایی نمی‌تواند بیانگر خشکسالی کشاورزی اتفاق افتاده بلکه تاثیر مقدار رطوبت ناحیه‌ی ریشه از طریق شاخص SMI نقش مهمی در این ارتباط دارد و تغییرات شاخص‌های SMI و Z در ارتباط همسو و نسبتاً یکسانی با شاخص ADI می‌باشند. از اینرو شاخص ADI با در نظر گرفتن رطوبت خاک طی ماه‌های خشک می‌تواند به پایش و برآورد جامع‌تر وضعیت رطوبتی کمک موثری نماید.

نتایج مناسب شاخص ADI در پایش وضعیت‌های رطوبتی به ویژه طی ماه‌های خشک سال نشان داد که ساختار مناسب و انعطاف‌پذیر این شاخص ضمن در نظر گرفتن متغیرهای مهم و مؤثر بر خشکسالی امکان استخراج یک شاخص تجمیعی که بیشترین واریانس ممکن از متغیرهای ورودی را برآورد



- of Irrigation and Drainage Engineering 141(1):04014044
- Ficklin DL, Letsinger SL, Gholizadeh H, Maxwell JT (2015) Incorporation of the penman–monteith potential evapotranspiration method into a palmer drought severity index tool. *Computers & Geosciences* 85:136–141
- Ghabaei Sough M, Mosaedi A, Zare Abyaneh H (2016) Requisiteness of drought monitoring based on multivariate indices. In: Proc. of 6<sup>th</sup> National Conference on Iran Water Recourses Management, 20-22 April, University of Kurdistan-Iran (In Persian)
- Genest C, Favre AC (2007) Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(4):347–368
- Govindaraju RS (2013) Special issue on data-driven approaches to droughts. *Journal of Hydrologic Engineering* 18:735–736
- Hao Z, AghaKouchak A (2013) Multivariate standardized drought index: A multi-index parametric approach for drought analysis. *Advances in Water Resources* 57:12–18
- Hao Z, Singh VP (2015) Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology* 527:668–678
- Karamouz M, Araghinejad SH (2005) *Advanced hydrology*. Amirkabir University of Technology. Tehran polytechnic Press, 460p (In Persian)
- Keyantash JA, Dracup JA (2004) An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research* 40(9):W09304
- Jacobi J, Perrone D, Duncan LL, Hornberger G (2013) A tool for calculating the palmer drought indices. *Water Resources Research* 49(9):6086-6089
- Li Q, Zeng M, Wang H, Li P, Wang K, Yu M (2015) Drought assessment using a multivariate drought index in the Huaihe River basin of Eastern China. In: Proc. of the International Association of Hydrological Sciences 369:61–67
- Lloyd-Hughes B, Saunders MA (2002) A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22:1571–1592
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proc. of the 8<sup>th</sup> Conference on
- 4- Kernel Principal Component Analysis
- 5- Multivariate Drought Index
- 6- Palmer Drought Severity Index
- 7- Self-calibrated Palmer Drought Severity Index
- 8- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- 9- Soil Moisture Index
- 10-Self-calibrating Palmer Hydrology Drought Index
- 11- Standardized Streamflow Index
- 12- Xinanjiang
- 13- Huaihe
- 14- Standardized Precipitation Index
- 15- Modified Standardized Precipitation Index
- 16- Modified Reconnaissance Drought Index
- 17- Reconnaissance Drought Index
- 18- Standard Normal Homogeneity
- 19- Buishand Range
- 20- Pettitt
- 21- Von Neumann Ratio
- 22- Soil, Plant, and Atmosphere
- 23- Generalized Extreme Value distribution

## ۵- مراجع

- Alizade A, Kamali GH (2007) *Crops water requirements in Iran*. Astan Qods Razavi Press, 228p (In Persian)
- Bazrafshan J, Hejabi S, Rahimi J (2014) Drought monitoring using the Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPI). *Water Resources Management* 28(4):1045-1060
- Bazrafshan O, Mohseni Saravi M, Malekian A, Moeini A (2011). A study on drought characteristics of Golestan province using Standardized Precipitation Index (SPI). *Iranian journal of Range and Desert Research* 18(3):395–406 (In Persian)
- Beguiría S, Vicente- Serrano SM, Reig F, Latorre B (2014) Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34(10):3001–3023
- Dehban H, Ebrahimi K, Araghi Nejad SH (2015) Evaluation of MRDI as a new index (case study: Gorganroud basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46(1):19–30 (In Persian)
- Doerffer R, Schiller H (2008) *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*. Available at <https://earth.esa.int/documents/10174/1591138p>
- Ebrahimpour M, Rahimi J, Nikkhah A, Bazrafshan, J (2014) Monitoring agricultural drought using the standardized effective precipitation index. *Journal*

- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K (2016) Response to comment on 'Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI)'. *International Journal of Climatology* 36(4):2132–2138
- Svoboda M, LeCompte D, Hayes M, Heim R (2002) The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8):1181
- Van der Loo MP (2010). Distribution based outlier detection for univariate data. *Statistics Netherlands*, 10003
- Vangelis H, Tigras D, Tsakiris G (2013) The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments* 88:130–140
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010) A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate* 23(7):1696–1718
- Woli P, Jones JW, Ingram KT, Fraisse CW (2012) Agricultural Reference Index for Drought (ARID). *Agronomy Journal* 104:287–300
- Yu M, Li Q, Lu G, Wang H, Li P (2015) Development and application of a short- /long-term composited drought index in the upper Huaihe river basin, China. In: *Proc. of the International Association of Hydrological Sciences* 369:103–108
- Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California
- Meyer SJ, Hubbard KG, Wilhite DA (1991) The relationship of climatic indices and variables to corn (maize) yields: a principal components analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 55(1-2):59–84
- Mosaedi A, Shahabi M (2007) Risk management by considerate microclimate of Golestan province. *Iranian Meteorological Organization*. Tehran, 167p (In Persian).
- Mosaedi A, Khalilzade M, Mohammadi Ostadkelaye, A (2008) Drought monitoring in Golestan province. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 15( 2):176–183 (In Persian)
- Rajsekhar D, Singh VP, Mishra AK (2015) Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. *Journal of Hydrology* 526:164–182
- Sivakumar MVK, Motha RP, Wilhite DA, Wood DA (2011) Agricultural drought indices. In: *Proc. of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices*, 2-4 June, Murcia, Spain, 197p
- Stagge JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K (2015) Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35(13):4027–4040