

ارائه و ارزیابی شاخص جدید MRDI در پایش خشک‌سالی (مطالعه موردی: حوضه گرگان‌رود)

حسین دهبان^۱، کیومرث ابراهیمی*^۲، شهاب عراقی نژاد^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۹/۱۱)

چکیده

استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی به منظور شناسایی، پایش، و جلوگیری از آثار خشک‌سالی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی بسیار مهم است. هدف پژوهش حاضر ارائه و ارزیابی یک شاخص جدید خشک‌سالی، به نام MRDI، و مقایسه آن با شاخص MSPI بر اساس شاخص‌های بارش استاندارد شده SPI و شناسایی خشک‌سالی^۱ (RDI) در مقیاس‌های زمانی مختلف با رویکرد آماری PCA در حوضه آبریز گرگان‌رود است. بر اساس نتایج، شاخص جدید چندمتغیره زمانی MRDI و شاخص چندمتغیره زمانی MSPI، به دلیل لحاظ متغیرهای زمانی مؤثر، نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره SPI و RDI تحلیل‌هایی دقیق‌تر و آسان‌تر دارند. مقایسه نتایج MRDI و MSPI بر مبنای آزمون ناپارامتری کلموگروف-اسمیرنوف نشان می‌دهد تفاوتی معنادار بین آن‌ها وجود ندارد و بیش از ۹۰ درصد مواقع رفتاری مشابه دارند. بررسی میزان این تشابه به تکرار این پژوهش در حوضه‌های معرف دیگر نیاز دارد.

کلیدواژگان: تحلیل مؤلفه‌های اساسی، خشک‌سالی، شاخص چندمتغیره زمانی.

مقدمه

خشک‌سالی پدیده‌ای است که به صورت مکرر و تقریباً در هر نوع آب‌وهوایی به وقوع می‌پیوندد. خشک‌سالی‌ها را می‌توان به چهار گروه عمده هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی، و اقتصادی-اجتماعی تقسیم کرد. در خشک‌سالی هواشناسی، کمبود میزان بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت برای یک منطقه برآورد می‌شود. در خشک‌سالی هیدرولوژیکی، وضعیت بلندمدت جریان‌های رودخانه‌ای و آب‌های زیرزمینی و دیگر منابع برآورد می‌شود. در خشک‌سالی کشاورزی ذخیره رطوبتی خاک در طول فصل رشد بررسی می‌شود. طبیعتاً، یافته‌های علمی هر یک از خشک‌سالی‌های فوق در بررسی خشک‌سالی اقتصادی-اجتماعی به کار می‌رود (Wilhite and Galantz, 1985). یکی از روش‌های پایش و کمی‌سازی خشک‌سالی استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است. ولی باید دقت شود یک شاخص خشک‌سالی قادر به کمی‌سازی خشک‌سالی برای دوره‌های زمانی مختلف است (Panu and Sharma, 2002). تعداد زیادی از شاخص‌های

خشک‌سالی به منظور کمی‌سازی خشک‌سالی معرفی شده‌اند که هر یک قوت‌ها و ضعف‌های خود را دارند. از طرفی مشاهده شده است که بیشتر قاره‌ها در سه دهه اخیر دچار خشک‌سالی شده‌اند و این موضوع با افزایش تقاضای آب در برابر منابع محدود آن اهمیت می‌یابد (Mishra and Sing, 2010). قرارگرفتن بر کمربند خشک جهان و ایجاد شرایط خاص آب‌وهوایی باعث نمایان شدن پدیده خشک‌سالی در کشور ایران شده است (Iranian Forests, Range and Watershed Management Organization, 2004). بنابراین، استخراج شاخص‌های خشک‌سالی در هر ناحیه باید با احتیاط و دقت بیشتری صورت گیرد تا پایش و کمی‌سازی خشک‌سالی دقیق‌تر انجام شود. مثلاً در بررسی شاخص SPI، به منزله شاخصی رایج در پایش خشک‌سالی، مشخص می‌شود محاسبه این شاخص برای مناطقی که سری زمانی بارندگی آن‌ها دارای مقادیر زیادی صفر باشد (مناطق خشک) دچار مشکل می‌شود. چون در محاسبه این شاخص اغلب داده‌های بارندگی نسبت به توزیع احتمالاتی گاما برازش دارند، با وجود مقادیر صفر در سری زمانی بارندگی، باعث ایجاد چولگی به راست داده‌ها می‌شود که این خود سبب ایجاد خطا در استخراج توزیع احتمالاتی مناسب

* نویسنده مسئول: Ebrahimik@ut.ac.ir

1. Reconnaissance Drought Index

چندمتغیره و انتخاب مناسب‌ترین شاخص نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره آسان‌تر است. در شاخص‌های تک‌متغیره ممکن است دو شاخص خشک‌سالی در مقیاس زمانی مختلف همبستگی بالا و پایین از خود نشان دهند. مثلاً در پژوهشی که Shamsnia (2014) در زمینه مقایسه شاخص RDI و SPI انجام داد به این نتیجه رسید که با افزایش طول بازه زمانی همبستگی بین این دو شاخص کم می‌شود و در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر همبستگی بالاتری وجود دارد. با وجود این، مقایسه این دو شاخص اندکی دشوار می‌شود که شاخص چندمتغیره زمانی با لحاظ اثر همه مقیاس‌های زمانی بررسی شده به صورت ترکیبی خطی این مشکل را برطرف می‌کند.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز گرگان‌رود، واقع در استان گلستان، در بخش جنوب شرقی دریای خزر قرار دارد و در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران بخشی از حوضه آبریز دریای خزر به حساب می‌آید. این حوضه در محدوده طول جغرافیایی ۵۴-۰۰ تا ۵۶-۲۹ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ ۳۶ تا ۴۷ ۴۷ شمالی واقع شده است و از شمال و شرق به حوضه رودخانه اترک و از جنوب به حوضه‌های آبریز کویر نمک و از جنوب غربی به حوضه رودخانه نکا محدود می‌شود. در شکل ۱ موقعیت حوضه در کل کشور می‌آید (Jamab, 2005).

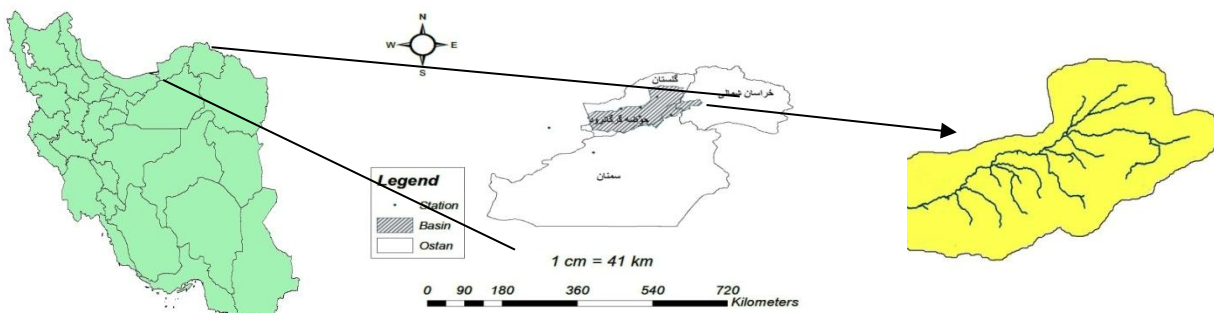
مساحت این حوضه حدود ۱۳۰۶۱ کیلومتر مربع است. حدود ۵۹/۵ درصد آن را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد و ۴۰/۵ درصد دیگر شامل کوهپایه و دشت است که مناطق شمالی و غربی حوضه را شامل می‌شود. شهرهای کردکوی، گرگان، بندرترکمن، آق‌قلا، گنبدکاووس، علی‌آباد، مینودشت، و آزادشهر در این حوضه قرار دارند. همچنین، بر اساس تقسیمات به‌عمل‌آمده، این حوضه دو دشت به نام‌های گرگان- گنبد و رباط- قره‌بیل دارد. در پژوهش حاضر، از بین ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه هفت ایستگاه ارازکوسه، بهلکه‌داشلی، تمرگرگان، تیرتاش، رامیان، سد گرگان، و غفارحاجی جهت تهیه مقادیر سری‌های زمانی بارندگی و نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق پتانسیل در یک دوره ۴۰ ساله (۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰) انتخاب شد. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ می‌آید.

خواهد شد (Mishra and Sing, 2010). همچنین این شاخص‌ها باید در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه و بررسی شوند. از این رو، باید توجه داشت عدم آگاهی از مقیاس زمانی مناسب و محاسبه شاخص خشک‌سالی در چندین مقیاس زمانی ممکن است باعث سردرگمی هنگام تحلیل نتایج شود (Bazrafshan et al, 2014). برای حل این مسئله می‌توان از تکنیک‌هایی چون تحلیل مؤلفه‌های اساسی (PCA)^۱ جهت ارائه شاخص‌های خشک‌سالی مناسب در مقیاس‌های مختلف زمانی کمک گرفت. روش PCA مناسب برای شناسایی الگوهای زمانی و مکانی در داده‌های هواشناسی است (Smit, 2002). برای کاهش ابعاد مسئله استفاده می‌شود و از ترکیب‌های خطی مختلف (به تعداد ابعاد مسئله) تشکیل شده است. این ترکیب‌های خطی از محاسبه بردار ویژه و مقادیر ویژه، که از ماتریس همبستگی استفاده می‌کند، به دست می‌آید. بردارهای ویژه میزان همبستگی بین داده‌ها و ترکیبات خطی متناظر با آن‌ها از سری زمانی را نشان می‌دهند (Martins et al, 2012). Bonaccorso et al (2003) در پژوهشی در زمینه تغییرات مکانی خشک‌سالی، با استفاده از شاخص SPI، در سیسیل، از روش آماری PCA استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد در منطقه مطالعه شده تنوع آب‌وهوایی منسجمی با تمایل به سمت خشکی وجود دارد؛ طوری که این منطقه سه نوع آب‌وهوای مختلف دارد. Bazrafshan et al (2014) شاخص خشک‌سالی SPI را در نقاط مختلف ایران، در مقیاس‌های زمانی مختلف، با به‌کارگیری روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی بررسی کردند و به شاخصی جدید، به نام بارش استاندارد شده چندمتغیره (MSPI)^۲، دست یافتند که ضمن لحاظ کردن بازه‌های مختلف زمانی در خود (کاهش ابعاد مسئله) مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی به صورت چندمتغیره را راحت‌تر و دقیق‌تر از شاخص‌های تک‌متغیره کرده است. در پژوهش حاضر هدف اصلی ارائه و ارزیابی شاخص جدید چندمتغیره MRDI^۳ به روش PCA و مقایسه آن با شاخص MSPI بر مبنای شاخص‌های متداول SPI و RDI است. به عبارت دیگر، هدف این پژوهش ارزیابی دو شاخص خشک‌سالی RDI و SPI در حالت چندمتغیره در حوضه آبریز گرگان‌رود است. در این حالت تصمیم‌گیری بر اساس شاخص

1. Principal Components Analysis

2. Multivariate Standardized Precipitation Index

3. Multivariate Reconnaissance Drought Index



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده، حوضه آبریز گرگان رود

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و هواشناسی ایستگاه‌های استفاده شده در حوضه گرگان رود

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی درجه دقیقه	عرض جغرافیایی درجه دقیقه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع داده استفاده شده	متوسط درازمدت بارش سالیانه (میلی متر)	متوسط درازمدت دمای سالیانه (سانتی گراد)
۱	ارازکوسه	۵۵	۹	۳۷	۱۴	۳۴	۲۱۶
۲	بهلکه داشلی	۵۴	۴۸	۳۷	۳	۲۴	۲۰۶
۳	تمرگران	۵۳	۳۰	۳۷	۳۰	۱۳۴	۲۱۶
۴	تیرتاش	۵۳	۴۳	۳۶	۴۴	۱۲	۱۲۰
۵	رامیان	۵۵	۸	۳۷	۱	۲۰۰	۲۱۸
۶	سد گرگان	۵۴	۴۴	۳۷	۱۲	۱۲	۲۰۳
۷	غفارحاجی	۵۴	۸	۳۶	۶۰	-۲۲	۲۰۷

(رابطه ۱)

$$SPI = \frac{R_{ik} - \bar{R}_k}{SD_k}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^N P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{رابطه ۲})$$

SPI شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده، N تعداد سال‌های دارای آمار، P_{ij} بارندگی ماه j ام در سال i ام (به عبارت دیگر معادل عددی بارش نسبت به توزیعی که به آن برازش داده شده است)، \bar{R}_k و SD_k نیز به ترتیب میانگین و ارتفاع و انحراف معیار بارندگی تجمعی در سال i ام برای دوره k مینا در کل سال‌های آماری است. مقادیر k بیانگر دوره‌های زمانی ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه است. روشی که برای محاسبه SPI در این پژوهش استفاده شد روش برازش توزیع روی داده‌های بارش است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. در جدول ۲ طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI می‌آید (McKee et al, 1993).

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده

این شاخص را McKee et al (1993) ارائه کردند. این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و یگانه فاکتور مؤثر در محاسبه آن متغیر بارندگی است. این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. شاخص بارش استاندارد شده بر اساس احتمال بارش برای هر بازه زمانی محاسبه می‌شود و به منظور هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی اهمیت زیادی دارد. این شاخص برای کمی کردن کمبود بارش در بازه‌های زمانی چندگانه طراحی شده است. مقدار شاخص SPI بر اساس ارتفاع بارش تجمعی (R_{ik}) برای دوره مبنای k مربوط به i سال هیدرولوژیکی با رابطه‌های ۱ و ۲ به دست می‌آید (McKee et al, 1993; Cancelliere et al, 2007).

جدول ۲. طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI

SPI	بزرگ‌تر یا مساوی ۲	۱٫۵ تا ۱٫۹۹	۱ تا ۱٫۴۹	-۰٫۹۹ تا -۰٫۹۹	-۱٫۴۹ تا -۱	-۱٫۹۹ تا -۱٫۵	کوچک‌تر یا مساوی -۲
شدت خشکسالی	مرطوب خیلی شدید	رطوبت زیاد	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	خشکی زیاد	خشکی خیلی شدید

شاخص شناسایی خشکسالی

شاخص RDI را Tsakiris et al (2007) ارائه کردند و در سطح حوضه‌های آبریز محاسبه می‌شود. مزیت این شاخص در

دخالت‌دادن فاکتور اقلیمی تبخیر- تعرق پتانسیل علاوه بر فاکتور بارندگی است. این شاخص از برازش تابع توزیع احتمالاتی (معمولاً لوگ نرمال) بر مقادیر نسبت بارش به تبخیر-

در بخش نتایج، شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب چگونگی تبدیل توزیع احتمال گاما به توزیع نرمال استاندارد شده و چگونگی تبدیل توزیع احتمال ویبول به توزیع نرمال استاندارد شده می‌آید.

معرفی و محاسبه شاخص خشک‌سالی MRDI و MSPI

برای محاسبه MRDI و MSPI داشتن سری زمانی RDI و SPI در مقیاس زمانی مختلف ضروری است. مقادیر RDI و SPI بر اساس برآزش بهترین توزیع احتمالاتی به ترتیب روی داده‌های بارش و نسبت بارش به تبخیر- تعرق پتانسیل (برای سری‌های زمانی SPI و RDI در هر مقیاس زمانی بهترین توزیع انتخاب شد) و اصل انتقال هم‌احتمال در نرم‌افزار متلب (۲۰۰۹) محاسبه شد. شاخص جدید MRDI و شاخص MSPI بر اساس SPI و RDI‌های محاسبه شده در دوره‌ای چهار و یک ساله (۱۳۵۰-۱۳۹۰) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ ماهه در نرم‌افزار XLSTAT به روش PCA محاسبه می‌شود.

تحلیل مؤلفه‌های اساسی (PCA)

عملگر PCA همبستگی دوه‌دوی متغیرها را بررسی می‌کند (این همانند تشکیل یک فضای چندبعدی از متغیرهاست، که اصطلاحاً ابر چندبعدی نامیده می‌شود) که خروجی آن ترکیب خطی k متغیر اصلی است. رابطه ۶ فرمول محاسبه هر یک از ترکیبات خطی را نشان می‌دهد (Bazrafshan et al, 2014):

$$PC_i = E_i^T X = \sum_{j=1}^k e_{ij} X_k, \quad i=1,2,3,4 \quad (\text{رابطه ۶})$$

PC_i آمین ترکیب خطی اساسی، E_i^T آمین بردار ویژه (وزن‌های متغیرهای اساسی)، X_k آمین متغیر اساسی، و e_{ij} آمین مؤلفه از آمین بردار ویژه است. PCA سه ویژگی اصلی دارد (Sharma, 1996):

- ترکیبات خطی متعامدند (ناهمبسته‌اند).
- تعداد ترکیبات خطی (PC_i) با تعداد متغیرهای مسئله برابرند.
- اولین ترکیب خطی استخراج شده (PC_1) بیشترین درصد واریانس کل متغیرها را به خود اختصاص می‌دهد (به عبارت دیگر، بهترین ترکیب خطی است).

قبل از اینکه عملگر PCA صورت گیرد باید مطمئن شد همبستگی معناداری بین متغیرها وجود دارد. این میزان همبستگی با آزمون کرویت بارتلتس^۱ مطابق رابطه ۷ سنجیده می‌شود (Snedecor et al, 1989):

تعرق پتانسیل و استاندارد کردن آن به دست می‌آید (Tsakiris et al, 2007). مراحل محاسبه RDI در پی می‌آید:

ابتدا با استفاده از مقادیر نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق پتانسیل (ET_0)، مقادیر اولیه α_0 برای هر بازه زمانی دلخواه (در اینجا سال‌های مختلف) با رابطه ۳ به دست می‌آید (Tsakiris et al, 2007):

(رابطه ۳)

$$\alpha_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,12$$

P_{ij} و PET_{ij} به ترتیب مقادیر باران و تبخیر- تعرق پتانسیل ماه زام از سال تام است. پارامتر N برابر تعداد سال‌هایی است که آمار دارد. روش پیشنهاد شده برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل در مناطق مرطوب روش تورنت- وایت است که از داده‌های دمای میانگین استفاده می‌کند. در گام بعدی مقادیر RDI نرمال شده (RDI_n) با استفاده از مقادیر α_0 برای سال‌های مختلف با رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Tsakiris et al, 2007):

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha_0^{(i)}}{\alpha_0} - 1 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$\bar{\alpha}_0$ میانگین حسابی مقادیر α_0 در سال‌های مورد نظر است.

در گام سوم برای محاسبه شاخص RDI محاسبه مقادیر RDI استاندارد شده (RDI_{st}) با رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (\text{رابطه ۵})$$

y برابر است با مقدار α_0 بر توزیع احتمالی که نسبت به آن بیشترین برآزش را دارد. به این ترتیب \bar{y} و $\hat{\sigma}_y$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر y در سال تام است. مقادیر طبقه‌بندی RDI استاندارد شده مشابه طبقه‌بندی‌ای است که McKee et al (1993) برای شاخص SPI (جدول ۲) ارائه کرده‌اند (Tsakiris et al, 2007).

اصل انتقال هم‌احتمال

بهترین حالت انتقال یک متغیر از یک توزیع آماری به توزیعی دیگر انتقال هم‌احتمال است؛ که در آن احتمال‌های کمتر یا مساوی دو متغیر از دو توزیع با هم برابر فرض می‌شوند (Karamouz and Araghinejad, 2005). در این پژوهش نیز روش محاسبه SPI و RDI بر اساس برآزش توزیع احتمالاتی مناسب به ترتیب نسبت به داده‌های بارش و داده‌های نسبت بارش به تبخیر- تعرق پتانسیل و اصل انتقال هم‌احتمال است.

زمانی PC_1 مقدار استاندارد شده Z_{1ym} در سال y ام و در مقیاس زمانی m ام، $\bar{P}C_{1m}$ میانگین PC_1 برای بازه زمانی m ام، و SD_{1m} انحراف معیار PC_1 در بازه زمانی m ام است. مقدار $\bar{P}C_{1m}$ ناچیز است و می‌تواند از معادله ۷ حذف شود (Keyantash and Dracup, 2004). مقادیر استاندارد شده PC_1 معادل با MRDI یا MSPI است که طبقه‌بندی خشکسالی آن‌ها مطابق طبقه‌بندی RDI و SPI است.

یافته‌ها و بحث

معمولاً مقادیر مربوط به بارندگی و سایر پارامترهای هواشناسی، مثل بارش و تبخیر و دما، توزیع نرمال ندارند. از این رو، این داده‌ها می‌توانند از توزیع احتمالاتی خاصی تبعیت کنند. بنابراین، همان‌طور که گفته شد، قبل از محاسبه شاخص خشکسالی MRDI و MSPI باید توزیع احتمالاتی هر یک از پارامترهای ورودی آن‌ها (بارندگی برای محاسبه SPI و نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق پتانسیل برای محاسبه RDI)، که بهترین برازش را داشته باشد، جهت محاسبه SPI و RDI مشخص شود. جهت انتخاب بهترین توزیع، داده‌های بارندگی و نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق پتانسیل در مقیاس‌های زمانی مختلف وارد نرم‌افزار Easyfit شدند و بر اساس آزمون کلموگروف- اسمیرنوف ارزیابی شدند. نتایج انتخاب بهترین توزیع تا شش توزیع برتر به طور خلاصه برای ایستگاه سد گرگان در مقیاس زمانی ۳ ماهه در جدول‌های ۳ و ۴ می‌آید.

(رابطه ۷)

$$\chi^2 = \frac{(N - K) \times \ln(S_p^2) - \sum_{i=1}^K (n_i - 1) \ln(S_i^2)}{1 + \frac{1}{3(K-1)} \left(\sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{n_i - 1} \right) - \frac{1}{N - K} \right)}$$

K تعداد متغیرها با n_i تا SPI یا RDI، S_i^2 واریانس SPIها و RDIها، و N مجموع n_i هاست. χ^2 به دست آمده با رابطه ۶ دارای توزیع کای اسکوتر است. اگر همبستگی بین متغیرها معنادار باشد، می‌توان مقادیر ویژه و بردار ویژه متناظر با هر یک از ترکیب‌های خطی را با رابطه ۸ محاسبه کرد:

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (رابطه ۸)$$

C ماتریس همبستگی به دست آمده از ماتریس سری زمانی SPI یا RDI برای هر مقیاس زمانی، λ مقدار ویژه برای هر بازه زمانی، و I ماتریس یکه است. مؤلفه‌های بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه ضریب (وزن) متغیرهای اساسی را در هر یک از ترکیب‌های خطی تشکیل می‌دهند. در اکثر مواقع فقط PC_1 به منزله قوی‌ترین ترکیب خطی انتخاب می‌شود. بعد از محاسبه PC_1 با بردن آن در رابطه ۹ تبدیل به نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ می‌شود (Bazrafshan et al, 2014).

$$Z_{1ym} = \frac{PC_{1ym} - \bar{P}C_{1m}}{SD_{1m}} \approx \frac{PC_{1ym}}{SD_{1m}} \quad (رابطه ۹)$$

جدول ۳. رتبه‌بندی توزیع‌های آماری نسبت به داده‌های بارندگی در مقیاس زمانی سه‌ماهه برای ایستگاه سد گرگان

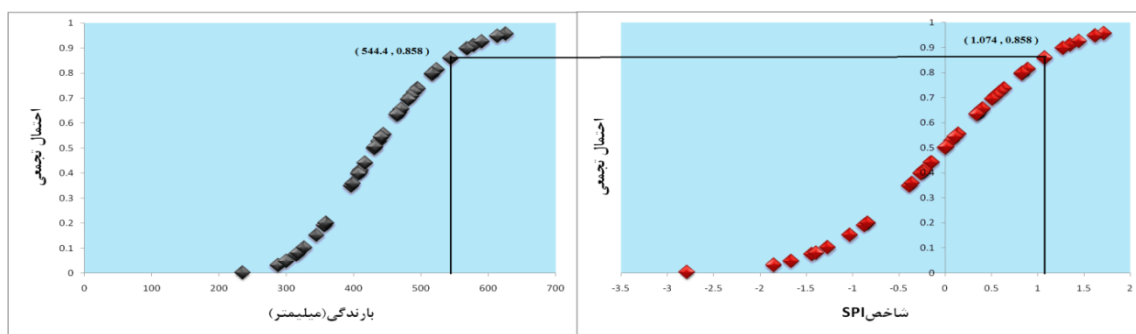
توزیع	گاما	توزیع مقادیر حدّ	لوگ نرمال	ویبول	پیرسون	جانسون SB
P-value	۰٫۹۹۳	۰٫۹۸۸	۰٫۹۸۶	۰٫۹۸۴	۰٫۹۷۷	۰٫۹۶۴
رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶

جدول ۴. رتبه‌بندی توزیع‌های آماری نسبت به داده‌های نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق پتانسیل در مقیاس زمانی سه‌ماهه برای ایستگاه سد گرگان

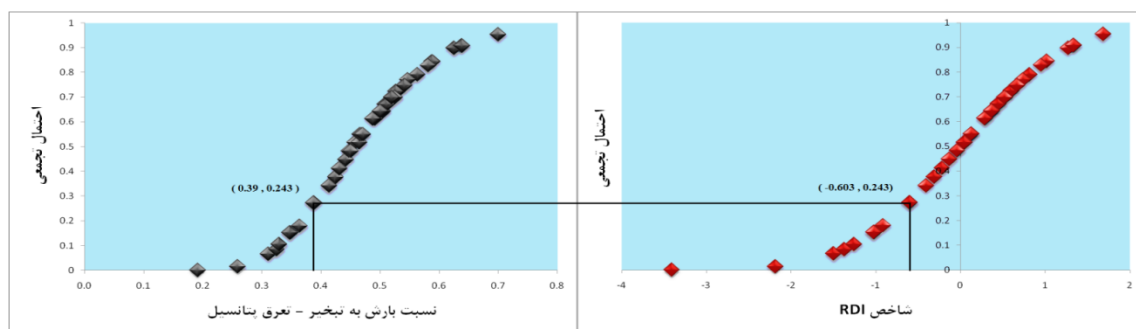
توزیع	ویبول	بور	توزیع مقادیر حدّ	گاما	پیرسون	جانسون SB
P-value	۰٫۹۱۶	۰٫۹۰۶	۰٫۸۱۲	۰٫۸۰۱	۰٫۷۹۹	۰٫۷۹۱
رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶

انتخاب بهترین توزیع و اصل انتقال هم‌احتمال در نرم‌افزار متلب (۲۰۰۹) محاسبه شد و همبستگی دوبه‌دوی SPIها با یکدیگر و RDIها با یکدیگر به طور جداگانه در نرم‌افزار XLSTAT به دست آمد. نتایج برازش بهترین توزیع و اصل انتقال هم‌احتمال و همچنین همبستگی بین متغیرها (SPIها و RDIها) به صورت گرافیکی در شکل‌های ۲ تا ۵ می‌آید.

با توجه به جدول‌های ۳ و ۴ بهترین توزیع برای سری ۳ ماهه بارش و نسبت بارش به تبخیر- تعرق پتانسیل ایستگاه سد گرگان با بیشترین مقدار P-value به ترتیب توزیع گاما و ویبول است. برای سایر ایستگاه‌ها نیز در مقیاس‌های زمانی مختلف داده‌ها بهترین توزیع برازش داده شده مشخص شد. شاخص‌های SPI و RDI برای مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ ماهه به روش



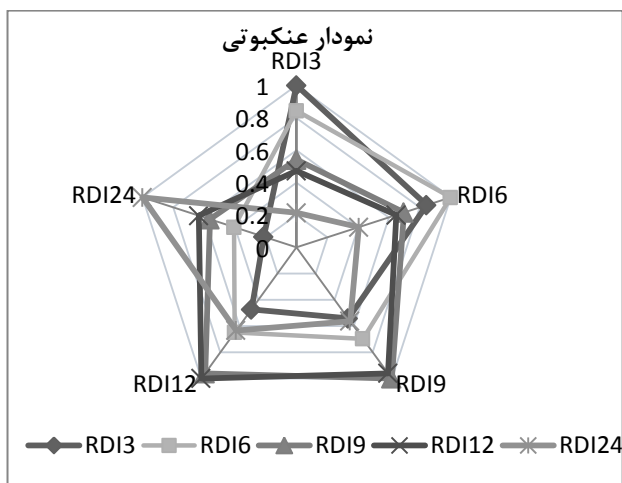
شکل ۲. انتقال هم‌احتمال از توزیع گامای تجمعی مقادیر بارش سه‌ماهه به توزیع نرمال استاندارد شده (SPI) در ایستگاه غفارحاجی



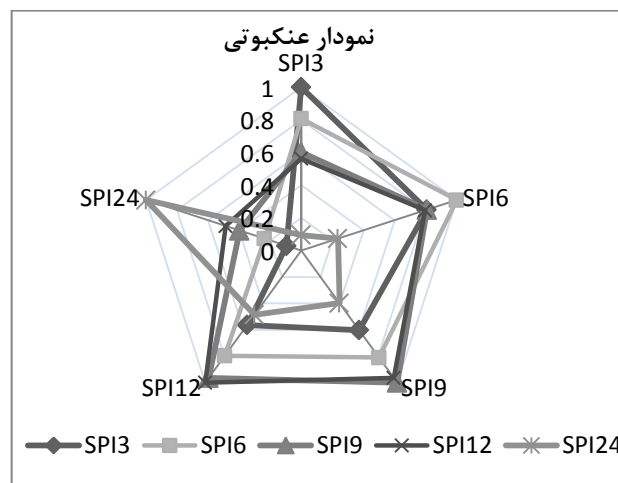
شکل ۳. انتقال هم‌احتمال توزیع ویبول تجمعی مقادیر نسبت بارش به تبخیر- تعرق پتانسیل سه‌ماهه به توزیع نرمال استاندارد شده (RDI)، ایستگاه غفارحاجی

توزیع نرمال استاندارد شده معادل SPI با مقدار $1/0.74$ و احتمال 0.858 است. این کار برای سایر ایستگاه‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف انجام شد و سری‌های مختلف SPI و RDI برای محاسبه شاخص‌های چندمتغیره به دست آمد.

شکل‌های ۲ و ۳ اصل انتقال هم‌احتمال برای ایستگاه غفارحاجی را نشان می‌دهد که به ترتیب منجر به محاسبه SPI و RDI ۳ ماهه شده است. مثلاً، در شکل ۲ مقدار بارش 544.4 میلی‌متر با احتمال تجمعی 0.858 روی توزیع گاما با انتقال به



شکل ۴. همبستگی بین شاخص SPI در بازه زمانی مختلف، ایستگاه سد گرگان



شکل ۵. همبستگی بین شاخص RDI در بازه زمانی مختلف، ایستگاه سد گرگان

همبستگی جهت بررسی امکان انجام دادن PCA روی داده‌ها، از آزمون بارتلتس روی مقیاس زمانی مختلف مقادیر SPI و RDI استفاده شد. نتایج این آزمون، که مبتنی بر توزیع کای اسکوئر است، در جدول ۵ برای همه ایستگاه‌ها می‌آید.

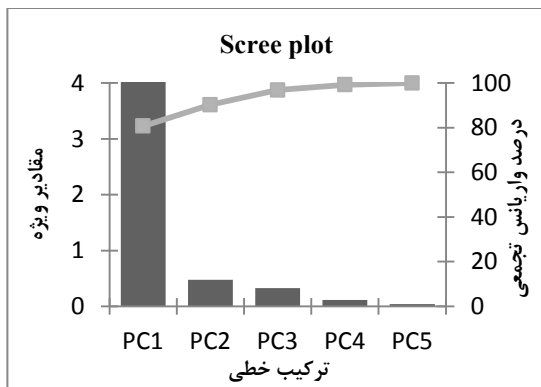
در شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر همبستگی متغیرها (SPI و RDI در مقیاس زمانی مختلف) نسبت به هم رسم شده است. مثلاً، میزان همبستگی بین RDI3 و RDI6، با توجه به شکل ۵، تقریباً برابر 0.8 است. برای تعیین معنادار بودن این میزان

جدول ۵. نتایج آزمون بارتلتس بین مقادیر SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف با یکدیگر و مقادیر مختلف RDI در سطح ۵٪

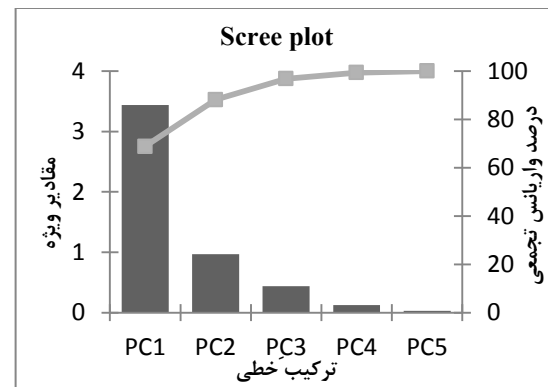
ایستگاه	ارازکوسه	بهلکه‌داشلی	تمرگرگان	تیرتاش	رامیان	سد گرگان	غفارحاجی
p-value	<۰٫۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۱	<۰٫۰۰۰۱
کای‌اسکوئر جدول	۱۸٫۳۰	۱۸٫۳۰	۱۸٫۳۰	۱۸٫۳۰	۱۸٫۳۰	۱۸٫۳۰	۱۸٫۳۰
کای‌اسکوئر محاسبه‌شده SPI	۱۲۶٫۷۲	۱۹۲٫۲۱	۲۰۰٫۹۹	۲۱۵٫۹۶	۲۱۸٫۴۷	۱۹۷٫۵۳	۱۷۲٫۴۰
کای‌اسکوئر محاسبه‌شده RDI	۱۱۱٫۲۰	۱۷۵٫۳۰	۱۸۴٫۹۰	۲۰۲٫۴۴	۲۴۴٫۶۷	۱۹۲٫۷۴	۱۴۰٫۱۰

و بردار ویژه هر یک از ترکیبات خطی (PC1 تا PC5) با استفاده از ماتریس همبستگی در نرم‌افزار XLSTAT محاسبه و مشخص شد بیشترین تغییرات متغیرها (بازه‌های زمانی مختلف) را PC1 توجیه کرده است. در شکل‌های ۶ و ۷ میزان واریانس تجمعی و مقادیر ویژه در برابر ترکیب‌های خطی در ایستگاه سد گرگان می‌آید.

در جدول ۵ مقادیر کای‌اسکوئر محاسبه‌شده در همه ایستگاه‌ها بیشتر از مقدار جدول (حد بحرانی) است. از این رو، همبستگی بین SPIها در مقیاس‌های زمانی مختلف و نیز بین RDIها در مقیاس‌های زمانی مختلف برای همه ایستگاه‌ها معنادار است. بنابراین، می‌توان PCA را روی سری‌های زمانی مختلف از SPI و RDI در همه ایستگاه‌ها انجام داد. مقادیر ویژه



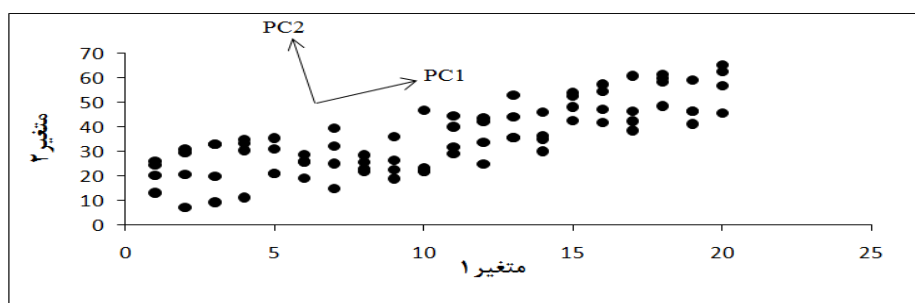
شکل ۷. نمودار تغییرپذیری و مقادیر ویژه نسبت به PC برای شاخص SPI، ایستگاه سد گرگان



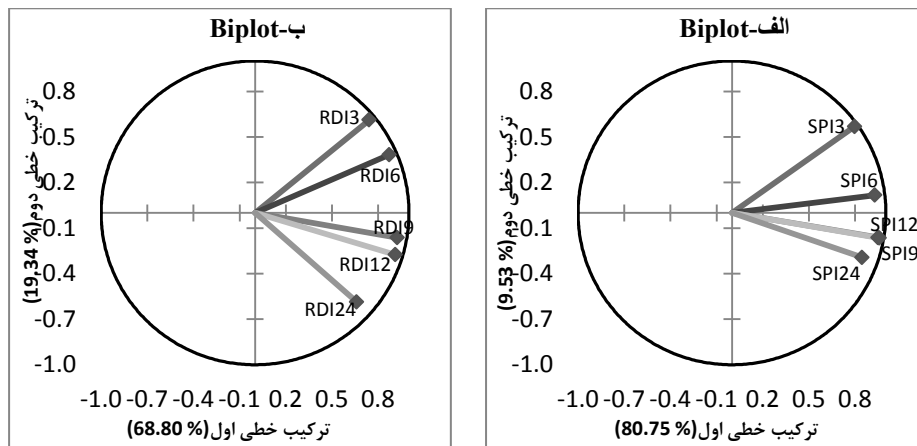
شکل ۶. نمودار تغییرپذیری و مقادیر ویژه نسبت به PC برای شاخص RDI، ایستگاه سد گرگان

گفته می‌شود PC1 تغییرپذیری داده‌ها را بهتر توجیه می‌کند به این معناست که رفتار و کشیدگی داده‌ها با راستای خط حاصل از PC1 همبستگی بیشتری دارد. این موضوع در شکل ۸ برای یک مسئله فرضی دومتغیره نشان داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، کشیدگی و تغییرات داده‌ها بیشتر در جهت PC1 است و تغییرات و کشیدگی در جهت PC2 کمتر دیده می‌شود. بنابراین، PC1 این مثال بهتر می‌تواند رفتار داده‌ها را نسبت به PC2 شبیه‌سازی کند.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین تغییرپذیری متغیرها (بیشتر از ۸۰٪ برای SPI و بیش از ۶۰٪ برای RDI) و بیشترین مقدار ویژه مربوط به PC1 است. بنابراین، PC1 جهت محاسبه MSPI و MRDI انتخاب شد. البته در مواردی که تغییرپذیری سایر ترکیبات خطی (معمولاً PC2) نیز زیاد باشد، باید ترکیبات خطی بر اساس PC1 و PC2 محاسبه شود؛ در غیر این صورت باعث ایجاد خطا در تحلیل نتایج می‌شود. در این پژوهش فقط PC1 انتخاب شد. زمانی که



شکل ۸. تطابق رفتاری داده‌ها نسبت به دو ترکیب خطی PC1 و PC2 برای دو متغیر فرضی ۱ و ۲



شکل ۹. نمودار Biplot برای شاخص SPI؛ ب) نمودار Biplot برای شاخص RDI، ایستگاه سد گرگان

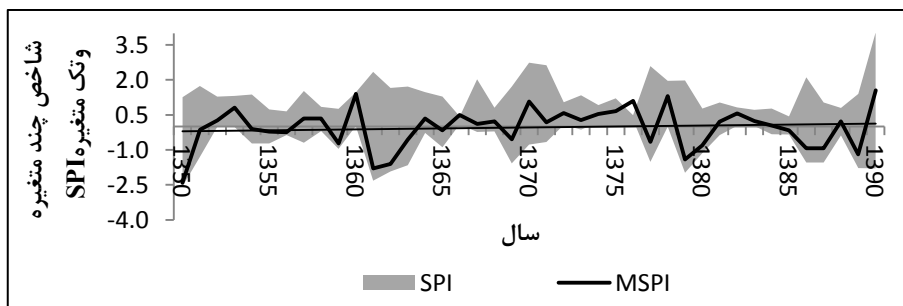
میان ۶ و ۹ و ۱۲ ماهه) و همبستگی در سری زمانی ۶ و ۹ و ۱۲ ماهه بیشتر است. بعد از محاسبه PC1، مقادیر آن باید به نرمال استاندارد تبدیل شود که معادل با شاخص‌های چندمتغیره زمانی (MRDI و MSPI) خواهد بود. طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص جدید MRDI و شاخص MSPI همانند طبقه‌بندی SPI جدول ۲ است.

مقایسه MRDI با MSPI مبنی بر RDI و SPI

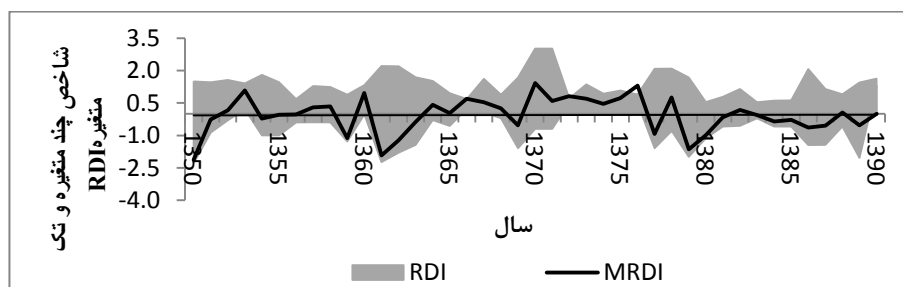
جهت مقایسه شاخص جدید MRDI با شاخص MSPI، ابتدا جداگانه هر یک از این شاخص‌های چندمتغیره زمانی با مقادیر پایه خود (RDI و SPI) در مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ ماهه مقایسه می‌شود. نتایج به صورت گرافیکی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌آید.

برای نشان دادن میزان همبستگی هر یک از SPI و RDI در مقیاس‌های زمانی مختلف نسبت به PC1 و PC2، نمودار Biplot، که درصد تغییرات PC1 در مقابل PC2 را برای متغیرها نشان می‌دهد، برای نمونه، در ایستگاه سد گرگان در شکل ۹ رسم می‌شود.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که RDI و SPI ۶ و ۹ و ۱۲ ماهه بیشترین همبستگی و RDI و SPI ۳ و ۲۴ ماهه کمترین همبستگی را نسبت به PC1 از خود نشان داده‌اند. سایر ایستگاه‌ها به جز داده‌های RDI ایستگاه غفارحاجی رفتاری مشابه ایستگاه سد گرگان داشته‌اند. بنابراین، برای شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات در مقیاس‌های زمانی کوچک (۳ ماهه) و بزرگ (۲۴ ماهه) بیشتر از مقیاس‌های زمانی



شکل ۱۰. سری زمانی SPI برای مقیاس زمانی ۳ تا ۲۴ ماهه (ناحیه هاشور) و سری زمانی MSPI در ایستگاه سد گرگان (۱۳۵۰-۱۳۹۰)

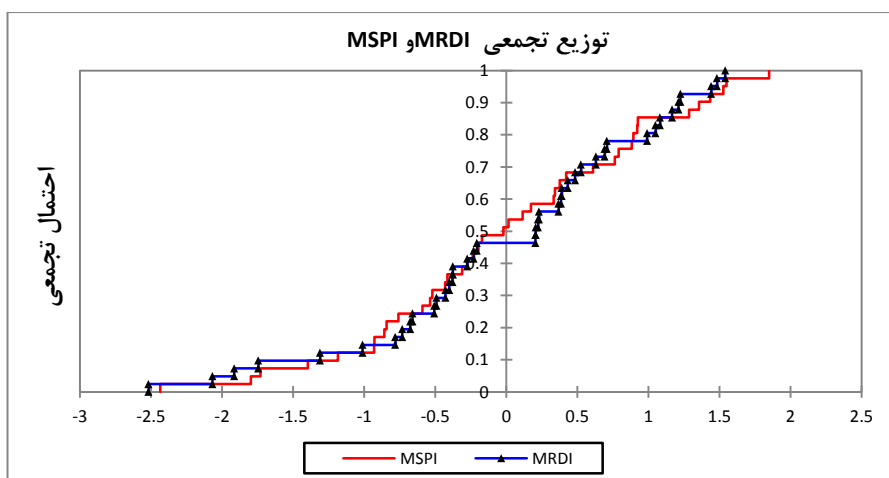


شکل ۱۱. سری زمانی RDI برای مقیاس زمانی ۳ تا ۲۴ ماهه (ناحیه هاشور) و سری زمانی MRDI در ایستگاه سد گرگان (۱۳۵۰-۱۳۹۰)

اینکه در یک زمان یک بازه اعداد از شاخص‌های خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف داشته باشیم، فقط یک عدد (مقدار شاخص چندمتغیره زمانی) در آن زمان را ارائه می‌دهد. مثلاً، در شکل ۱۱ مقدار عددی شاخص RDI (تک‌متغیره) در سال ۱۳۵۵ تقریباً در محدوده ۱- تا ۱٫۷ قرار دارد؛ در صورتی که شاخص MRDI (چندمتغیره) عددی نزدیک به ۰ را نشان می‌دهد. از این رو، کمی‌سازی و پایش خشکسالی به صورت چندمتغیره و تصمیم‌گیری بر اساس آن راحت‌تر است.

جهت ارزیابی MRDI، این شاخص با شاخص چندمتغیره زمانی MSPI (ارائه شده از سوی Bazrafshan *et al* (2014)) مقایسه شد. در این پژوهش برای مقایسه آماری دو شاخص MRDI و MSPI از آزمون ناپارامتری کلموگروف- اسمیرنوف استفاده شد و نتایج نشان داد که سری زمانی MSPI و MRDI با اطمینان‌پذیری بیش از ۹۰ درصد در همه ایستگاه‌ها شبیه هم‌اند. نتایج این آزمون، برای نمونه، به صورت گرافیکی در شکل ۱۲ برای ایستگاه سد گرگان می‌آید.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد MRDI و MSPI نوسانات و دوره‌های خشکسالی و ترسالی را همانند RDI و SPI ارائه می‌کنند؛ با این تفاوت که شدت خشکسالی در شاخص‌های چندمتغیره زمانی کمتر است. این موضوع موجب می‌شود خشکسالی یا ترسالی با شدت‌های کم در شاخص‌های چندمتغیره زمانی دیده نشود. در برخی موارد دیده می‌شود مقادیر MSPI و MRDI از مرز SPI و RDI تجاوز کرده که دلیل آن می‌تواند خطاها و لحاظ نکردن ترکیبات خطی دیگر (PC2) باشد. یکی از مزیت‌های شاخص‌های چندمتغیره زمانی در نظر گرفتن اثر همه متغیرها (مقیاس زمانی مختلف در این پژوهش) در مقایسه و تصمیم‌گیری است؛ طوری که شاخص چندمتغیره در هر زمان به صورت یک عدد بیان می‌شود. در حالی که شاخص تک‌متغیره در هر زمان به صورت یک بازه (ناحیه هاشور در شکل‌های ۱۰ و ۱۱) بیان می‌شود. به عبارت دیگر شاخص چندمتغیره زمانی MRDI و MSPI به نحوی نقش میانگین پیشرفته از شاخص‌های RDI و SPI را دارند و به جای



شکل ۱۲. سری زمانی تجمعی MSPI و MRDI در ایستگاه سد گرگان (۱۳۵۰-۱۳۹۰)

استخراج و با شاخص‌های MRDI و MSPI ارزیابی شد. در جدول ۶ مقادیر کمیته بارش و سال وقوع آن همراه وضعیت جوی از دیدگاه شاخص‌های خشکسالی نام‌برده می‌آید.

با توجه به مقادیر جدول ۶، در همه ایستگاه‌های بررسی شده مقادیر دو شاخص MRDI و MSPI در محدوده خشکسالی شدید و خشکسالی خیلی شدید قرار گرفته‌اند و هر دو نتایجی شبیه هم ارائه کرده‌اند؛ با این تفاوت که شاخص MRDI در برخی موارد شدت خشکسالی را اندکی بیشتر از MSPI نشان داده است. از این رو، می‌توان گفت MRDI بیشتر با واقعیت تطابق دارد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های پژوهش Shokohi (2012) انطباق دارد. نتایج تحقیق وی نشان داد

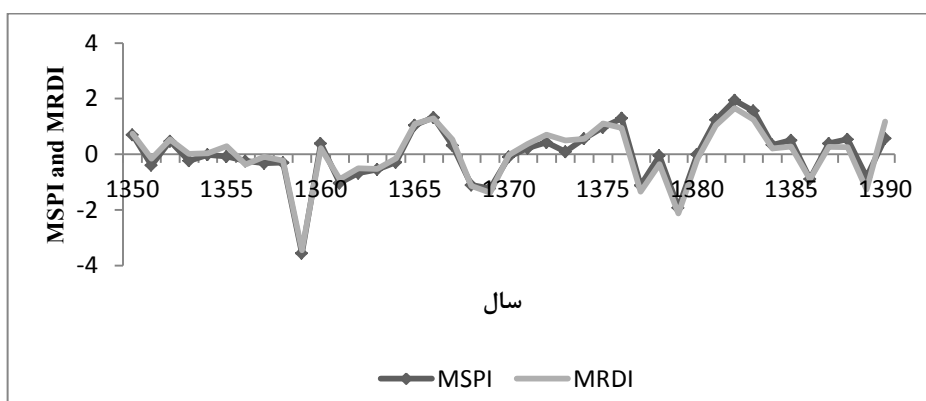
همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، در اکثر موارد رفتار این دو شاخص در این ایستگاه طی دوره آماری ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ شبیه هم بوده است؛ جز در برخی موارد که دلیل آن می‌تواند لحاظ کردن تبخیر در محاسبه RDI یا به عبارتی MRDI باشد. برای تشخیص اینکه در منطقه مطالعه شده کدام شاخص بهتر عمل می‌کند، از یک فرضیه به نام سنجه کارآمد برای پایش خشکسالی استفاده شد (Khalili and Bazrafshan, 2003). در این فرضیه کمیته مقدار بارندگی طی یک دوره بلندمدت اقلیمی منعکس‌کننده خشکسالی هواشناسی بسیار شدید یا شدیدی است که در منطقه اتفاق افتاده است. طبق این فرضیه ابتدا کمیته مقادیر بارندگی در طول دوره آماری

شاخص RDI در خشک‌سالی‌های شدید نسبت به شاخص SPI حساسیت بیشتری دارد و موفق‌تر از آن عمل می‌کند. در شکل ۱۳ نیز سری زمانی MSPI و MRDI در ایستگاه غفارحاجی، که

بیشترین تطابق این دو شاخص را نسبت به سایر ایستگاه‌ها نشان داد، می‌آید.

جدول ۶. مقادیر کمیته بارش و سال وقوع آن همراه مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی متناظر با آن

ایستگاه	سال وقوع	کمیته بارش (میلی‌متر)		ایستگاه	سال وقوع	شدت خشک‌سالی	
		MRDI	MSPI			MRDI	MSPI
ارازکوسه	۱۳۸۶	۲۲٫۳	-۲٫۳۸	رامیان	۱۳۸۶	۳۸٫۱	-۱٫۲۵
بهلکه‌داشلی	۱۳۸۶	۱۹٫۷	-۲٫۱	سدگرگان	۱۳۶۰	۱۶	-۲٫۲۶
تمرگرگان	۱۳۵۴	۱۸٫۵	-۲٫۵	غفارحاجی	۱۳۸۶	۲۵	-۱٫۳۳
تیرتاش	۱۳۷۹	۲۹٫۶	-۲٫۱۳	*	*	*	*



شکل ۱۳. سری زمانی MSPI و MRDI در ایستگاه غفارحاجی با بیشترین تطابق با هم

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، سری زمانی MSPI و MRDI رفتاری مشابه یک‌دیگر دارند. با توجه به نتایج این پژوهش، در استان گلستان، که منطقه‌ای مرطوب است، اثر تبخیر در پایش خشک‌سالی (در مقایسه شاخص MRDI با شاخص MSPI) کم است و می‌توان آن را در نظر نگرفت. برای مناطق دیگر این موضوع نیاز به بررسی دارد.

نتیجه‌گیری

یکی از وظایف برنامه‌ریزان و مدیران در تصمیم‌گیری در حوزه منابع آب انتخاب شاخصی مناسب جهت پایش خشک‌سالی است. بنابراین، باید از بین شاخص‌های موجود یک یا چند شاخص مناسب را انتخاب کنند. در پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی جهت انتخاب بهترین شاخص در مناطق مختلف اغلب شاخص‌ها در چند مقیاس زمانی مختلف مقایسه شده‌اند. مثلاً Tsakiris *et al* (2007) در پژوهشی به مقایسه شاخص‌های SPI، DI، RDI در منطقه مدیرانه پرداختند. آن‌ها برای ارزیابی شاخص RDI همبستگی آن را با شاخص SPI ملاک قرار دادند و اعلام کردند RDI از

مشابهت رفتاری بالایی با SPI برخوردار است. به طور کلی، محاسبه شاخص خشک‌سالی در ابعاد مختلف زمانی باعث شده مقایسه آن‌ها با یک‌دیگر و انتخاب بهترین شاخص در ارائه اطلاعات صحیح از خشک‌سالی اندکی دشوار باشد. در مواردی نیز انتخاب مقیاس زمانی مناسب برای یک شاخص خشک‌سالی خاص مهم است. مثلاً در مقایسه بین نظارت بر شدت خشک‌سالی بر پایه SPI در گام‌های زمانی مختلف در هلند Labedzki (2007) نشان داد مقیاس ۱ تا ۳ ماهه برای نظارت بر خشک‌سالی هواشناسی و کشاورزی بهتر از مقیاس ۶ ماهه جواب می‌دهد. Szalai *et al* (2000) نشان دادند منابع آب مخازن با SPI محاسبه‌شده در بازه‌های طولانی که خشک‌سالی هیدرولوژیکی را شناسایی می‌کند مرتبط است. بازه‌های زمانی طولانی (۲۴ یا ۳۶ ماهه) برای پایش خشک‌سالی روی سفره آب زیرزمینی مناسب است (Changnon and Easterling, 1989). اخیراً برخی محققان شاخص‌های جدیدی ارائه کرده‌اند با نام شاخص‌های چندمتغیره؛ که تفسیر خشک‌سالی را راحت‌تر کرده است و مقایسه آن‌ها با یک‌دیگر به مراتب آسان‌تر از شاخص‌های تک‌متغیره است و دغدغه انتخاب مقیاس زمانی مناسب برای

MRDI به روش PCA ارائه شد و عملکرد آن در مقایسه با شاخص MSPI یکسان و حتی در برخی موارد بهتر شد.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب به دلیل تأمین امکانات و داده‌های لازم جهت اجرای این پژوهش و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین مؤلفان از صرف وقت و دقت نظر داوران محترم که سبب ارتقای شایان توجه این مقاله شدند تشکر می‌کنند.

یک شاخص خاص را ندارد. شاخص‌های چندمتغیره به دلیل لحاظ کردن مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف (مقیاس زمانی مختلف در پژوهش حاضر) در خود و ارائه آن‌ها به صورت یک شاخص واحد می‌تواند نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره بهتر عمل کند. زیرا هم‌زمان می‌تواند خشک‌سالی کوتاه‌مدت (خشک‌سالی کشاورزی) و خشک‌سالی بلندمدت (خشک‌سالی ذخایر آبی و هیدرولوژیکی) را به صورت یک شاخص واحد تفسیر کند. از این رو، تصمیم‌گیری بر اساس شاخص چندمتغیره آسان‌تر از شاخص تک‌متغیره در مقیاس زمانی مختلف است. در پژوهش حاضر، شاخص چندمتغیره زمانی

REFERENCES

- Bazrafshan, J., Hejabi, S., and Rahimi, J. (2014). Drought Monitoring Using the Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPi). *Water Resources Management*, 28(4), 1045-1060.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., and Sutera, A. (2003). Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water resources management*, 17(4), 273-296.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B., and Rossi, G. (2007). Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water resources management*, 21(5), 801-819.
- Changnon, S. A. and Easterling, W. E. (1989). 'Measuring drought impacts: The Illinois case', *Water Resources Bulletin* 25, 27-42.
- Drought effects Reduction in Iran. Pooneh Publication, (In Farsi).
- Iranian Forests, Range and Watershed Management Organization (2004). National Action on Desertification and Jamab (Consulting Engineers Company). (2005). Comprehensive program studies of adaptation to climate, The present situation and the future water resources Gorganroud-Gharehsou Rivers Basin, (In Farsi).
- Karamouz, M. and Araghinejad, Sh. (2005). Analysis Advanced Hydrology (2th Edition), Amirkabir University Publication (Tehran, Iran) 375, (In Farsi).
- Keyantash, J. A. and Dracup, J. A. (2004). An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40(9).
- Khalili, A. and Bazrafshan, J. (2003). Evaluation and performance of several meteorological drought index in different climates of Iran. Nivar Publication (Tehran). No.(48, 48), (In Farsi).
- Labeledzki, L. (2007). Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index SPI. *Irrig. Drain.* 56:67-77.
- Martins, D. S., Raziei, T., Paulo, A. A., and Pereira, L. S. (2012). Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), 1493-1501.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Mishra, A. K. and Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216.
- Panu, U. S. and Sharma, T. C. (2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S1), S19-S30.
- Shamsnia, S. A. (2014). Comparison of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Standardized Precipitation Index (SPI) for Drought monitoring in arid and semiarid regions. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences* ISSN: 2231-6345 Vol. 4 (3) July-September, pp.39-44, (In Farsi).
- Sharma, S. (1996). Applied Multivariate Techniques, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- Shokohi, A. (2012). Comparison of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Standardized Precipitation Index (SPI) for Drought monitoring in the station scale relying on agricultural drought. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 3(9), (In Farsi).
- Smith, L. I. (Eds.) (2002). A tutorial on Principal Components Analysis, Computer sciences, 26, University of Otago, New Zealand.
- Snedecor, George W. and Cochran, William G. (1989). Statistical Methods, Eighth Edition, Iowa State University Press. ISBN 978-0-8138-1561-9.
- Szalai, S., Szinell, C. S., and Zoboki, J. (2000). 'Drought monitoring in Hungary', in Early warnings systems for drought preparedness and

drought management. World Meteorological Organization. Lisboa, 182-199.

Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.

Wilhite, D. A. and Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120.