

ارزیابی تطبیقی شاخص‌های SPI ، RDI و SDI در تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: دشت بم)

مینا اقتدارنژاد^۱، ام‌البین بذرافشان^۲، عدنان صادقی لاری^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۵

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

۲- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

۳- استادیار گروه باغبانی، دانشگاه هرمزگان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

چکیده

هدف از این تحقیق تعیین سه شاخص SPI ، RDI و SDI در پایش خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت بم و بررسی ارتباط آن‌ها با یکدیگر، تحلیل مشخصه‌های خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف و احتمال وقوع آن‌هاست. بررسی نتایج حاصل با استفاده از آزمون t جفت شده نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در نتایج شدت، مدت و فراوانی در شاخص SPI با RDI بوده و بیشترین شباهت ویژگی‌های یاد شده SDI با RDI به‌دست آمد. نتایج آزمون همبستگی متقاطع نشان‌دهنده ضرایب بالای همبستگی به‌صورت هم‌زمان در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه بوده که $SPI-48:RDI-48$ ، $SDI-48:RDI-48$ و $SPI-48:SDI-48$ به‌ترتیب دارای ضرایب همبستگی ۱، ۱ و ۰/۵۳ می‌باشد. نتیجه حاصل از بررسی روند پارامترهای اقلیمی با آزمون من-کنندال نشان داد که دبی جریان و باران دارای روند کاهشی و دما دارای روند افزایشی، اما فاقد روند معنی‌دار بوده است.

واژه‌های کلیدی: تابع همبستگی متقاطع، دشت بم، شاخص اکتشاف خشکسالی، شاخص بارش و دبی استاندارد شده

Adaptive Evaluation of SPI, RDI and SDI Indices in Analyzing the Meteorological and Hydrological Drought Characteristics (Case Study: Bam Plain)

M Eghtedar Nezhad¹, O Bazrafshan^{2*}, A Sadeghi Lari³

Received: 29 June 2015

Accepted: 05 September 2016

1-Msc Graduate, Dept. of Range and Watershed Management, University of Hormozgan, Iran

2-Assist. Prof., Dept. of Range and Watershed Management, University of Hormozgan, Iran

3-Assist. Prof., Dept. of Horticulture Science, University of Hormozgan, Iran

* Corresponding Author, Email: O.Bazrafshan@hormozgan.ac.ir

Abstract

The purpose of this study was to determine the RDI, SPI and SDI indices for monitoring the meteorological and hydrological droughts in Bam plain, investigate their relationships with each other, and analyze the drought characteristics in different time scales and the probability of their occurrences. The results of paired t-test revealed significant differences in the results of severity, magnitude and frequency of the SPI and RDI and the most similar characteristics were obtained between RDI and SDI. Cross correlation coefficient test results indicated a high correlation in the 48-month time scale, simultaneously, and SPI-48-RDI-48, SDI-48-RDI-48 and SPI-48-SDI-48 had the coefficients values of 1, 1 and 0.53, respectively. The results of trend studies of climatic parameters using the Mann Kendall method showed decrease in the precipitation and flow rate trends and increase in the temperature trend which were not significant.

Keywords: Bam Plain, Cross correlation function, Reconnaissance drought indices, Standardized precipitation indices, Streamflow drought indices.

مقدمه

خرمای مضافتی مصرفی داخل و خارج کشور را تأمین

می‌نماید از این پدیده مخرب در امان نمانده است.

کارآیی سیستم پایش خشکسالی متأثر از

شاخصی است که با توجه به وضعیت خشکسالی منطقه

انتخاب می‌گردد. طی سال‌های گذشته شاخص‌های

متعددی جهت پایش خشکسالی در بخش‌های هواشناسی،

کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی- اجتماعی ابداع

شده است (مندسینو و همکاران ۲۰۰۸)، که این شاخص‌ها

با استفاده از مجموعه پارامترهای ریزش‌های جوی نظیر

باران و برف و همچنین جریان رودخانه حاصل از

ریزش‌های جوی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بتواند

تصویر روشنی از این پدیده‌ها را ارائه دهد.

در بین شاخص‌های متنوع در پایش خشکسالی

اقلیمی، شاخص SPI مککی و همکاران (۱۹۹۳) به‌عنوان

شناخته‌شده‌ترین شاخص، به لحاظ دسترسی ساده به

داده آن (بارش)؛ امکان محاسبه آن در هر مقیاس زمانی؛

خشکسالی پدیده‌ای است که برگشت‌پذیر بوده و

می‌تواند بخش‌های مختلف زندگی انسان و محیط زیست

را تحت تأثیر قرار دهد و بر این اساس مستقیماً به مسئله

کمبود آب مرتبط می‌باشد (تیگگاس و همکاران ۲۰۱۲).

استان کرمان از جمله استان‌های زیان‌دیده خشکسالی

سال‌های اخیر در کشور محسوب می‌شود که در سال

۱۳۹۳ وارد شانزدهمین سال خشکسالی خود گردید. این

در حالی است که الگوهای بارش در این استان نشان می‌-

دهد، همچنان مقادیر بارش از متوسط کوتاه‌مدت و بلند

مدت فاصله زیادی دارد. از طرفی یک سوم باغ‌های

کشاورزی کشور در این استان قرار گرفته و از قطب‌های

کشاورزی در نیمه جنوبی کشور محسوب می‌شود

(اقتدارنژاد ۱۳۹۴). در این میان دشت بم به‌عنوان یکی از

دشت‌های حاصلخیز استان کرمان که با کیفیت‌ترین

سراب سید علی در استان لرستان و تبوزاده (۱۳۹۴) در حوضه بختگان، بدین نتیجه دست یافتند که، اثر خشکسالی اقلیمی بر هیدرولوژیکی در رودخانه‌های موقتی و فصلی، به صورت هم‌زمان است. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در تحلیل خشکسالی‌های شمال غرب ایران با استفاده از شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI) گزارش دادند، که تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری موجود خشکسالی‌ها را به تناوب تجربه نموده‌اند.

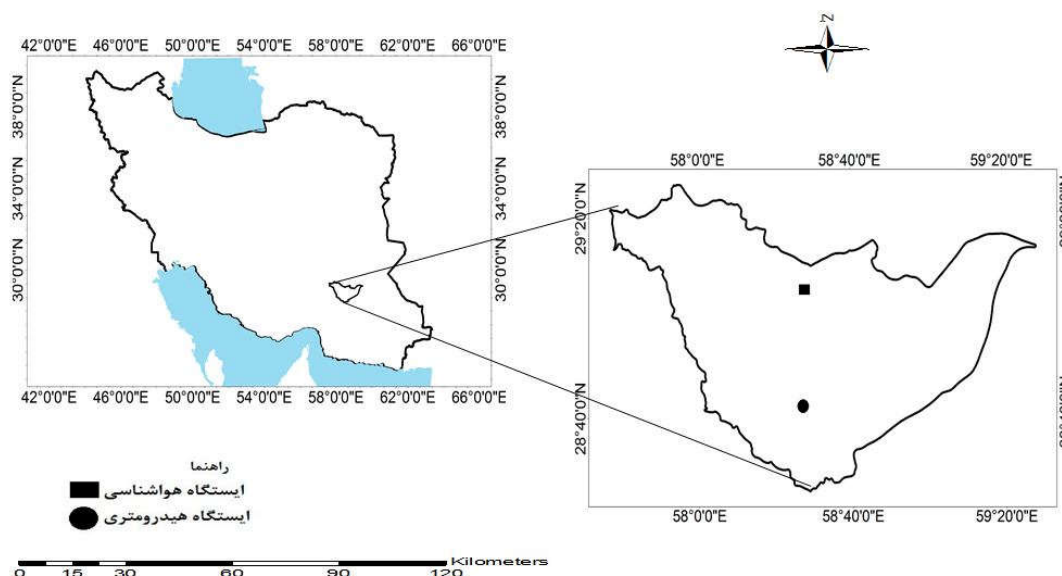
مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، در بررسی شاخص‌های خشکسالی کمتر به مقایسه سه شاخص *RDI*، *SPI* و *SDI* در بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و ارتباط زمانی آن‌ها در گام‌های زمانی مختلف پرداخته شده است، لذا هدف از این تحقیق پایش خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت بم و بررسی ارتباط آن‌ها با یکدیگر، تحلیل شدت، مدت- فراوانی یا به عبارت دیگر تحلیل مشخصه‌های خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی ۳ تا ۴۸ ماهه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت بم به فاصله ۲۰۷ کیلومتری جنوب شرقی مرکز استان کرمان و مساحت ۹۶۹۶ کیلومترمربع در حاشیه کویر لوت قرار دارد. این منطقه بین طول‌های ۱۵° و ۵۷° تا ۳۰° و ۵۹° شرقی و عرض‌های ۳۰° و ۲۸° تا ۴۵° و ۲۹° شمالی واقع شده است. از شمال به کویر لوت و از شرق به کویر سیستان، از غرب به سلسله جبال بارز و از جنوب به حوضه آبخیز جیرفت و رودبار محدود می‌باشد و مهم‌ترین رودخانه فصلی و موقتی آن رودخانه نرماشیر است (اقتدارنژاد ۱۳۹۴). شکل ۱ موقعیت دشت مورد مطالعه را در ایران، استان کرمان و شهرستان بم نشان می‌دهد. در این مطالعه از ایستگاه سینوپتیک بم و ایستگاه هیدرومتری یالخری بر روی رودخانه نرماشیر با طول دوره مشترک آماری ۳۷ ساله (۱۳۵۷-۱۳۸۹) که در فاصله ۱۵ کیلومتری هم قرار دارند، استفاده گردید.

محاسبه بزرگی، فراوانی و تداوم؛ تشخیص سریع رطوبت خاک و امکان نمایش توزیع مکانی مناطق تحت سیطره خشکسالی، به صورت گسترده‌ای در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد (هایز و همکاران ۱۹۹۹، میشر و دسای ۲۰۰۵). شاخص *RDI* نیز شاخص جدیدی است که در سال ۲۰۰۵ توسط ساکاریس و وانگلیس ارائه گردید و در حال حاضر محققان بسیاری از آن به منظور پایش خشکسالی استفاده می‌کنند. ساکاریس و همکاران (۲۰۰۷) در ارزیابی خشکسالی براساس شاخص *RDI* نشان دادند، گرچه عموماً پاسخ شاخص *RDI* مشابه شاخص *SPI* می‌باشد، ولی شاخص *RDI* حساس به تغییرات محیطی است و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین پاشیردیس و میشلدس (۲۰۰۸) و بذرافشان و همکاران (۲۰۱۰) به ارزیابی خشکسالی با استفاده از نمایه‌های *RDI* و *SPI* پرداخته‌اند. نتایج بذرافشان و همکاران (۲۰۱۰) نشان از همبستگی زیاد بین دو شاخص *SPI-RDI* در سواحل جنوبی و شمالی ایران و کاربرد آن-ها جهت ارزیابی و پایش خشکسالی داشت. در ارتباط با خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص قدرتمند و بدون بعد *SDI* را می‌توان نام برد. این شاخص براساس دبی استاندارد شده رودخانه‌ها و جریانات سطحی به دست می‌آید و اصول محاسباتی آن شبیه شاخص *SPI* است (شوکل و وود ۲۰۰۸، نلبنتیس و ساکاریس ۲۰۰۹). تیکاس و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از دو شاخص *RDI* و *SDI* به بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی بر خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه پرداختند. نتایج نشان داد، بیشترین همبستگی بین *RDI-۹* ماهه و *SDI-۱۲* ماهه بوده است. بذرافشان و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی شاخص *SPI* و *RDI* در حوضه آبخیز کرخه اعلام نمودند، بین دو شاخص فوق تا ۲۴ ماه آینده همبستگی مناسبی وجود ندارد. عزیزی (۱۳۸۲) در دشت قزوین، خزایی و نجفی (۱۳۹۰) در استان کهگیلویه و بویراحمد، در تحلیل روند بارش و دبی جریان با استفاده از شاخص‌های *SDI* و *SPI* تأثیرپذیری دبی از بارش را با تأخیر زمانی چندماهه گزارش دادند. لشنی‌زند و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه



شکل ۱- نقشه موقعیت دشت بم و ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان کرمان و ایران.

ایستگاه هیدرومتری بر توزیع آماری مناسبی برآزش داده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که در حوضه‌های کوچک توزیع گاما و در حوضه‌های بزرگ توزیع نرمال یا لوگ نرمال دو متغیره بهترین برآزش را دارد (شوکلا و وود ۲۰۰۸، نلبتیس و ساکاریس ۲۰۰۹). لذا مقادیر دبی ماهانه با استفاده از رابطه ۱ و ۲ بر توزیع گاما برآزش داده شده و احتمال تجمعی توزیع گاما محاسبه و سپس تغییر شکل هم احتمال تجمعی توزیع گاما به توزیع نرمال صورت می‌گیرد. شکل ۲ که در مرحله نهایی متغیر Z نرمال استاندارد شده یا SDI رابطه ۳ مربوط به هر مقدار دبی در هر ایستگاه در سطوح هم احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال استخراج می‌گردد (میشرا و دسای ۲۰۰۵).

$$g(x) = \frac{1}{B^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/B} \quad [1]$$

شاخص بارش استاندارد شده SPI^1 و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI^2

جهت مطالعه خشکسالی هواشناسی شاخص‌های متعددی ابداع گردیده، که معروف‌ترین آن‌ها شاخص بارش استاندارد SPI می‌باشد (مک کی و همکاران ۱۹۹۳). در زمینه خشکسالی هیدرولوژی تاکنون دو شاخص معروف تحت عنوان شاخص خشکسالی هیدرولوژی پالم $PHDSI^3$ (الی ۱۹۸۴) و شاخص ذخیره آب سطحی $SWSI^4$ (شفر و دیزمان ۱۹۸۲) پیشنهاد گردیده که به دلیل محاسبات زیاد و پیچیدگی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا جهت حل این مشکل می‌توان از شاخصی شبیه شاخص بارش استاندارد تحت عنوان شاخص دبی جریان (SDI) استفاده نمود که براساس متوسط جریان ماهانه می‌باشد و اولین بار توسط (بن زوای ۱۹۸۷) پیشنهاد گردید. اصول محاسباتی شاخص SDI مشابه شاخص SPI بوده، بدین صورت است که مقادیر دبی ماهانه هر

^۱ Palmer hydrologic drought index

^۲ Surface water supply index

^۱ Standardized precipitation index

^۲ Stream flow drought index

در این رابطه $\bar{\alpha}_0$ میانگین حسابی مقادیر α_0^i در سال‌های مورد بررسی است، که برابر با نسبت شاخص خشکسالی ارائه شد از سوی سازمان فائو است (ساکاریس و همکاران ۲۰۰۷).

عبارت سوم در محاسبه این شاخص، مقادیر استاندارد شده (RDI_{st}) است که با فرض اینکه مقادیر α_0^i از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کنند، استفاده از مقادیر α_0^i سال‌های مختلف مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$RDI_{st}^i = \frac{y_i - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad [۶]$$

در این رابطه y_i برابر است با $\ln \alpha_0^i$ و \bar{y} و $\hat{\sigma}_y$ به ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر y_i است. طبقه‌بندی شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

بررسی همبستگی بین شاخص خشکسالی هواشناسی با هیدرولوژی با استفاده از ضریب همبستگی متقاطع

جهت بررسی ارتباط هم‌زمانی و یا عدم هم‌زمانی وقوع رخداد خشکسالی هواشناسی با خشکسالی هیدرولوژی در مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه در دشت بم از روش تابع همبستگی متقاطع آدر محیط نرم‌افزاری Minitab 17 استفاده شد. ضریب همبستگی متقاطع نوعی روش استاندارد برای تعیین درجه همبستگی بین دو سری زمانی در گام زمانی مورد نظر اعم از گام‌های مثبت و منفی است (بذرافشان ۱۳۹۱). چنانچه مقدار X_i و Y_i با $i=1,2,\dots,N$ دو متغیر باشند مقدار R همبستگی آن‌ها به شکل رابطه زیر است (چانگ و همکاران ۱۹۹۷).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X})(Y_{(i-d)} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{(i)} - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{(i-d)} - \bar{Y})^2}} \quad [۷]$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{For: Lag time: } 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \\ \text{f: } i-d < 0, \quad i-d \geq N \end{array} \right.$

α پارامتر شکل و β پارامتر مقیاس است. x مقدار دبی و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad [۲]$$

$$SDI_{i,k} = \frac{Q_{i,k} - \bar{Q}_k}{SD_k} \quad [۳]$$

$Q_{i,k}$: مقدار دبی در ماه i ام و مقیاس K ام (۳، ۶، ۹ تا ۴۸ ماهه)؛ \bar{Q}_k : مقدار متوسط دبی در مقیاس k ام و SD_k : انحراف معیار در مقیاس K ام. شایان ذکر است که محاسبه SPI نیز به همین ترتیب می‌باشد (نلبنتیس و ساکاریس ۲۰۰۹).

شاخص خشکسالی احيائی RDI^5

ساکاریس و وانگلیس (۲۰۰۵) شاخص فوق را برای مناطق مدیترانه‌ای پیشنهاد نمودند. جهت محاسبه نخست با استفاده از نسبت بارندگی (P) به تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) مقادیر اولیه α_0^i برای هر بازه زمانی دلخواه یا سال‌های مختلف بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\alpha_0^i = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{i,j}}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,12 \quad [۴]$$

در این رابطه بارندگی $P_{i,j}$ و $PET_{i,j}$ به ترتیب مقادیر باران و تبخیر و تعرق پتانسیل ماه j ام از سال i ام و N برابر تعداد سال‌های آماری است. روش پیشنهادی محاسبه تبخیر و تعرق، روش تورنت‌وایت است (ساکاریس و وانگلیس ۲۰۰۵).

عبارت دوم در محاسبه این شاخص، مقادیر RDI نرمال شده (RDI_n) با استفاده از مقادیر α_0^i محاسبه شده برای سال‌های مختلف در گام قبلی، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$RDI_n^i = \frac{\alpha_0^i}{\bar{\alpha}_0} - 1 \quad [۵]$$

⁶ Cross correlation function

⁵ Reconnaissance drought index

n تعداد داده‌ها، x_i و x_j داده‌ها در سری زمانی Z و آماره آزمون استاندارد است (کیسی ۲۰۱۵). با توجه به آزمون آماری دوطرفه کای اسکور، اگر $|z| \leq z_{\alpha/2}$ در سطح معنی‌داری معین α باشد، فرض صفر پذیرفته شده و روند وجود ندارد. مقادیر مثبت آماره Z روند صعودی و مقادیر منفی نیز روند نزولی را نشان می‌دهند (بذرافشان و همکاران ۱۳۹۴).

نتایج و بحث

براساس روش‌شناسی هر یک از شاخص‌ها، ابتدا مقادیر بارش و دبی با استفاده از نرم‌افزار *Easy fit* بر بیش از ۶۰ نوع توزیع آماری برازش داده شد و توزیع مناسب براساس آماره کلموگروف-اسمیرونوف انتخاب و مقادیر *SPI* و *SDI* در مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸) محاسبه گردید. براساس جدول ۲، نتایج نشان داد که مقادیر بارش و دبی با توزیع گاما بهترین برازش را دارند. شکل ۲ نحوه تبدیل توزیع تجمعی گاما به شاخص دبی نرمال استاندارد شده را با استفاده از نرم‌افزار اکسل نشان می‌دهد.

جدول ۱- رده‌بندی شدت خشکسالی در شاخص‌های

SDI، *SPI* و *RDI* (مکی و همکاران ۱۹۹۳، ساکاریس و وانگلیس ۲۰۰۵، نلبنتیس و ساکاریس ۲۰۰۹).

مقادیر <i>RDI</i> ، <i>SDI</i> ، <i>SPI</i>	طبقات خشکسالی <i>RDI</i> ، <i>SDI</i> ، <i>SPI</i>
۲ و بیشتر	ترسالی خیلی شدید
۱/۵ تا ۲	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۵	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا -۱	نرمال
-۱ تا -۱/۵	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۲	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	خشکسالی خیلی شدید

در این رابطه مقادیر \bar{X} و \bar{Y} مقدار میانگین هر یک از سری‌های زمانی $X_{(i)}$ و $Y_{(i)}$ هستند. اگر رابطه γ را برای همه تأخیرهای زمانی مشخص $d=1, 2, \dots, N-1$ محاسبه نمائید، در یکی از گام‌های تأخیر بالاترین همبستگی را خواهید داشت. با توجه به شرط در رابطه γ ، نقاط $i \geq N$ و $i < 0$ مورد توجه نبوده و مقدار ضریب همبستگی متقاطع همواره $-1 \leq R \leq +1$ خواهد بود (چن و همکاران ۲۰۰۴).

آزمون تحلیل روند من-کندال

کندال (۱۹۷۵) متغیر τ (*tau*) را جهت اندازه‌گیری رابطه همبستگی بین x و y ارائه کرد و من (۱۹۴۵) با استفاده از آزمون کندال یکی از متغیرها را مؤلفه زمانی در نظر گرفت تا وجود روند را در سری داده‌ها مورد آزمون قرار دهد. مراحل محاسبه شامل محاسبه اختلاف بین تک تک مشاهدات با همدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر S به صورت رابطه ۸، محاسبه واریانس توسط رابطه ۱۰ و محاسبه آماره Z با استفاده از رابطه ۱۱ است.

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad [8]$$

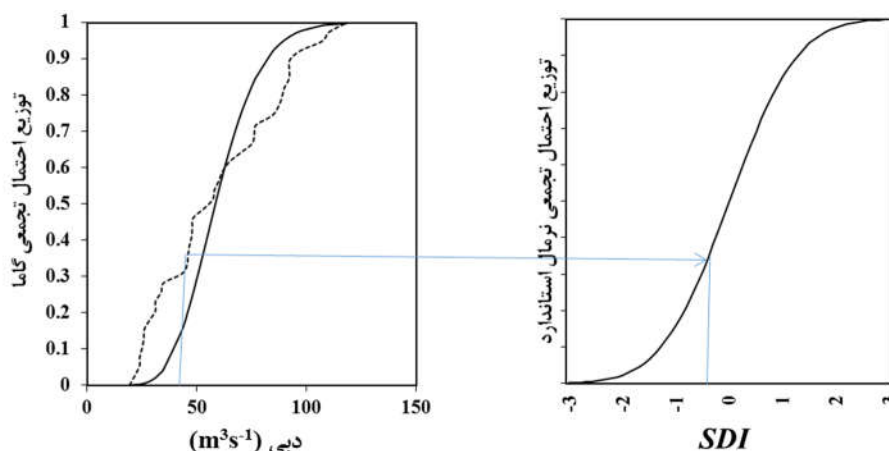
$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \end{cases} \quad [9]$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad [10]$$

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad [11]$$

جدول ۲- نتایج برازش توزیع آماری گاما بر پارامترهای هیدرواقليمی.

نام متغیر	توزیع منتخب	آماره $K-S$	معنی‌داری آماره در سطح اطمینان ۹۵٪
دبی	گاما	۰/۰۴	۰/۴۴*
باران	گاما	۰/۰۳	۰/۷۷*

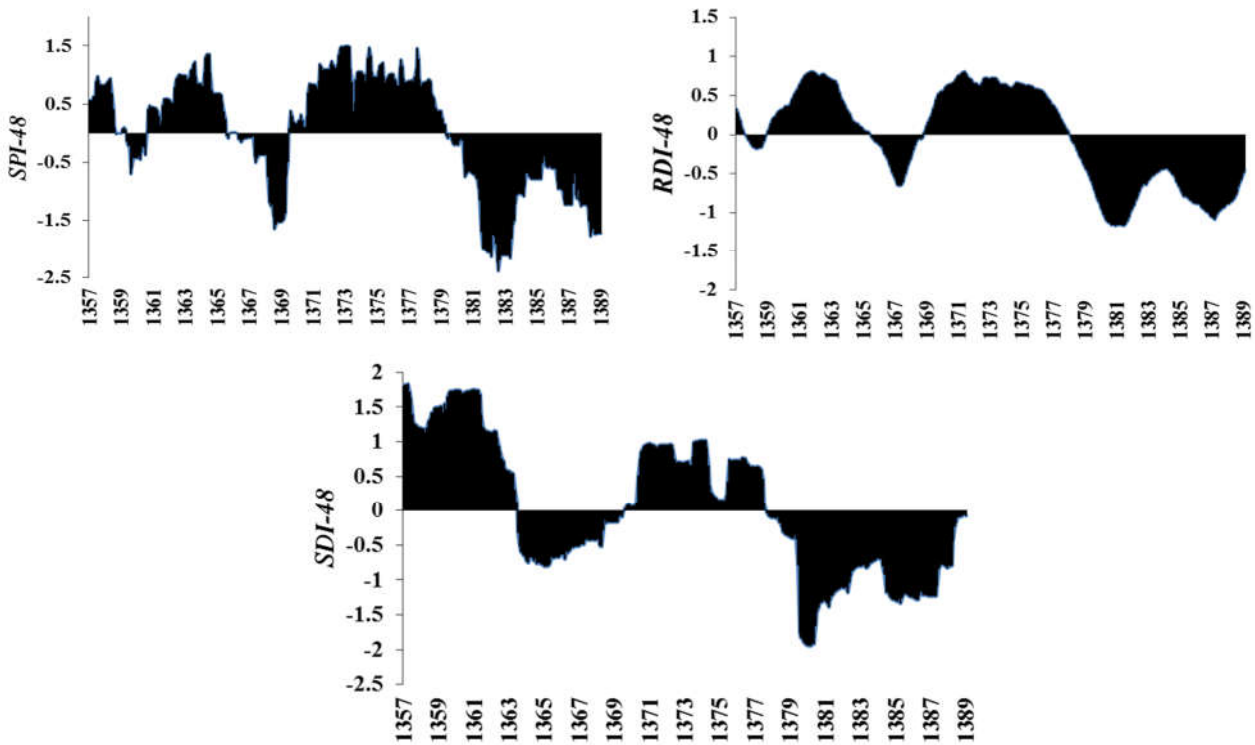


شکل ۲- تغییر شکل هم‌احتمالی تابع تجمعی توزیع گاما (سمت چپ) مجموع دبی‌های ۱۲ ماهه (ژانویه تا دسامبر) به تابع تجمعی نرمال (سمت راست) در ایستگاه هیدرومتری یالخری.

خصوصیات خشکسالی

طبق اصول کلی، در محاسبه میانگین متحرک با افزایش مقیاس زمانی از سه ماهه به ۴۸ ماهه میزان نوسانات خشکسالی کمتر می‌گردد، لذا برای نشان دادن وضعیت کلی خشکسالی در دشت بم، از مقیاس زمانی ۴۸ ماهه استفاده گردید. شکل ۳ روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌های به وقوع پیوسته در طول دوره آماری در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. طبق نتایج در دوره ۳۷ ساله، دشت بم طی دو دوره با ترسالی (طی سال‌های ۱۳۵۸ تا ۱۳۶۳ و ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۷) و دو دوره با خشکسالی (طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۶۹ و ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۹) همراه بوده، دوره‌های ترسالی نسبتاً بلند مدت و بیش از دو سوم کل دوره مطالعاتی را در بر می‌گیرد، اما دوره خشکسالی که مربوط به زمان کنونی است (سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹) با تداوم طولانی مدت ۱۲۰ ماهه یا ده ساله بوده که در واقع بالاترین شدت خشکسالی محسوب می‌گردد. براساس نتایج تغییرات دوره‌های خشکسالی و ترسالی در دو شاخص SPI و

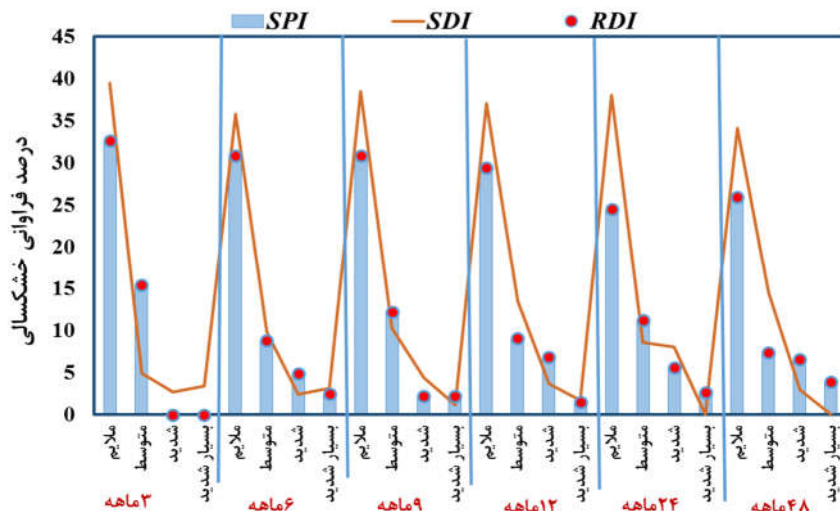
RDI به لحاظ شروع و پایان خشکسالی تقریباً مشابه بوده اما تغییرات شاخص RDI کمتر و خشکسالی را با شدت کمتری ارائه نموده اما در SPI تغییرات ناگهانی بوده و با کوچکترین تغییر در نوسان بارندگی از شدت و ضعف خشکسالی کاسته و یا افزوده شده است. در مورد شاخص SDI، نیز با تغییر در مقدار بارندگی و تأثیر بر روی دبی، دوره‌های طولانی‌تر خشکسالی و ترسالی را نشان می‌دهد و شدت خشکسالی نیز کمتر شده است. برای بررسی معنی‌داری اختلاف بین مشخصه‌های خشکسالی (شدت، مدت و فراوانی) در هر شاخص از آزمون t جفت شده استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمون فوق حاکی از تفاوت معنی‌دار بین جفت شاخص‌های SPI-RDI و SPI-SDI در مشخصه تداوم خشکسالی و جفت شاخص SPI-RDI در بزرگی خشکسالی است (جدول ۳). از طرفی به لحاظ بالاترین شدت و تداوم، شاخص SDI بالاترین مقادیر را نشان می‌دهد، به طوری که با افزایش مقیاس زمانی بر مقدار این ویژگی‌ها افزوده می‌گردد.



شکل ۳- تغییرات دوره‌های ترسالی و خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه در شاخص *SPI*، *RDI* و *SDI*.

(جدول ۳). بیشترین عدم تطابق بین مشخصه‌های خشکسالی، در فراوانی خشکسالی است، به طوری که در مقیاس‌های ۲۴ و ۴۸ ماهه سه شاخص فوق در کلاس خشکسالی شدید و خیلی شدید هیچ‌گونه شباهتی را نشان نمی‌دهند. در واقع شاخص *RDI* دو کلاس مذکور را در مقیاس‌های زمانی مختلف لحاظ نکرده است.

شکل ۴ درصد فراوانی خشکسالی سه شاخص *SPI*، *RDI* و *SDI* در مقیاس‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین درصد فراوانی مربوط به کلاس خشکسالی ملایم در خشکسالی هیدرولوژیکی است و از نظر فراوانی خشکسالی، بیشترین تطابق نتایج با استفاده از آزمون *t* جفتی بین شاخص *RDI-SPI* مشاهده گردید



شکل ۴- درصد فراوانی خشکسالی سه شاخص *SPI*، *RDI* و *SDI* در مقیاس‌های زمانی مختلف.

منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی خشکسالی

برای تحلیل آماری مشخصه‌های خشکسالی ابتدا لازم است تا رخدادهای خشکسالی در سری‌های زمانی *SPI*، *RDI* و *SDI* شناسایی شوند و سپس برای هر پدیده خشکسالی، دو مشخصه تداوم و بزرگی خشکسالی استخراج و توزیع احتمال آن‌ها مشخص شود. محققان از بین توزیع‌های نظری موجود، دو توزیع گاما و نمایی را برای بزرگی خشکسالی پیشنهاد می‌کنند (مکی و همکاران ۱۹۹۳، زلنهایسک و سالوای ۱۹۸۷، شیائو و شن ۲۰۰۱). نتایج حاصل از برازش توزیع‌های متفاوت، بر بزرگی و تداوم خشکسالی نشان می‌دهد، اغلب توزیع گاما و ویبول مناسب‌ترین توزیع است. نمونه‌ای از منحنی

های شدت - مدت - فراوانی برای دشت بم در شکل ۵ ارائه شده است. طبق شکل، با افزایش مقیاس زمانی و دوره بازگشت در ایستگاه‌ها، تداوم و بزرگی خشکسالی افزایش می‌یابد. براساس نتایج به دست آمده بالاترین شدت و تداوم خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف مربوط به شاخص *SDI* است، به طوری که در صورت احتمال وقوع خشکسالی با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله، دشت بم خشکسالی هیدرولوژیکی با بزرگی ۱۸۰ و تداوم ۲۰۰ ماهه را تجربه خواهد کرد. در بررسی دو شاخص دیگر به ترتیب *SPI* و *RDI* مقادیر بزرگی ۱۲۰ و ۱۱۰ و تداوم ۸۰ و ۷۰ ماهه رخ خواهد داد.

جدول ۳- مقایسات جفتی تداوم، بزرگی و درصد فراوانی کلاس‌های خشکسالی در شاخص‌های مورد مطالعه

(* معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵٪)

		درجه آزادی	آماره <i>t</i>	مقایسات جفتی شاخص‌ها	<i>P-Value</i>
مشخصه تداوم					
جفت ۱	<i>SPI - RDI</i>	۵	-۴/۸۳۶		۰/۰۰۵*
جفت ۲	<i>SDI - SPI</i>	۵	۲/۶۳۵		۰/۰۴*
جفت ۳	<i>RDI - SDI</i>	۵	۰/۱۹۱		۰/۸۵۶
مشخصه بزرگی					
جفت ۱	<i>SPI - RDI</i>	۵	-۳/۲۵۷		۰/۰۲۳*
جفت ۲	<i>SDI - SPI</i>	۵	۲/۱۷۰		۰/۸۲
جفت ۳	<i>RDI - SDI</i>	۵	۰/۳۴۳		۰/۷۴
مشخصه درصد فراوانی					
جفت ۱	<i>SPI - RDI</i>	۲۳	-۲/۵۱		*۰/۰۲
جفت ۲	<i>SDI - SPI</i>	۲۳	۱/۵۷		۰/۱۲۹
جفت ۳	<i>RDI - SDI</i>	۲۳	۰/۵		۰/۶۲۶

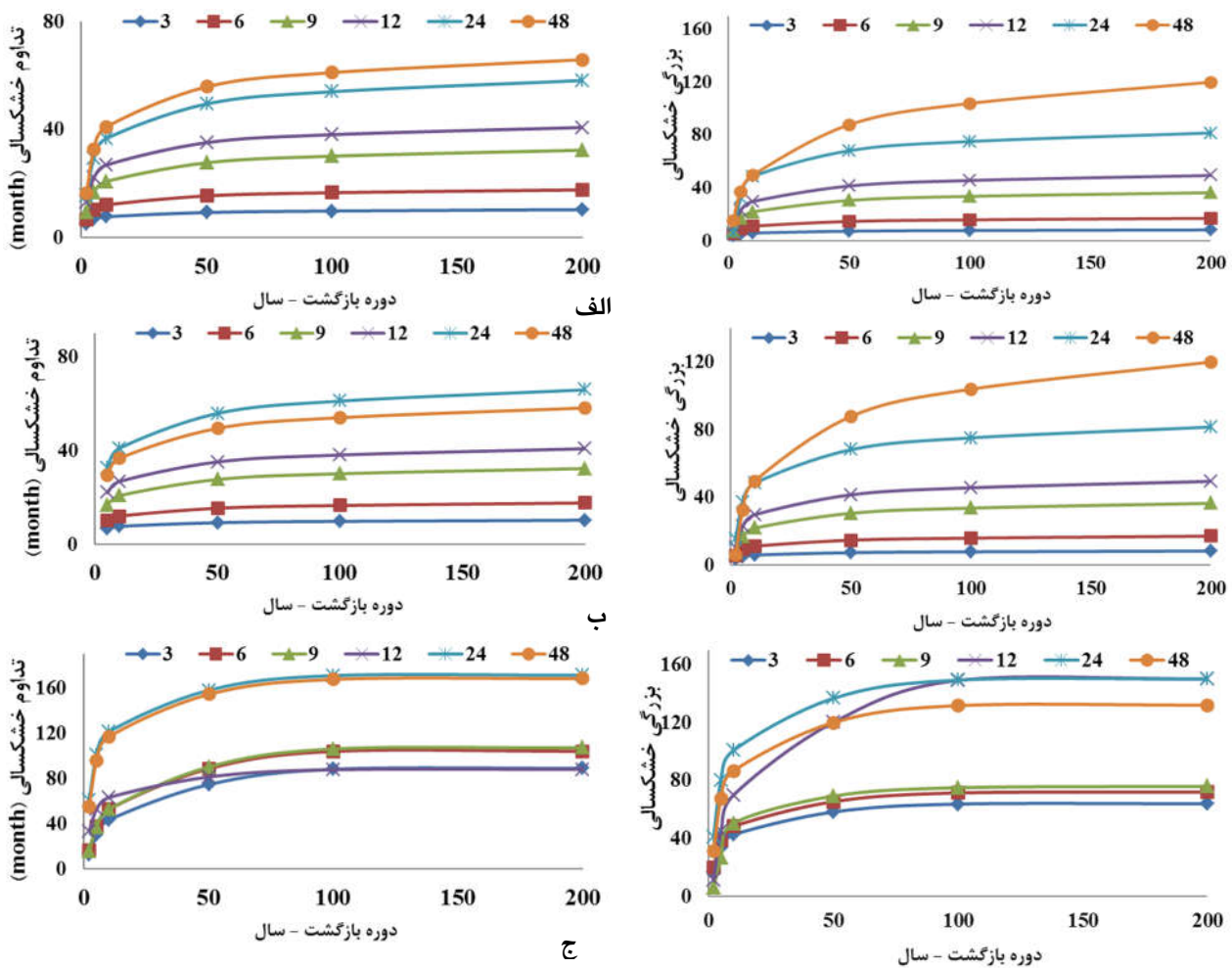
نتایج ضریب همبستگی متقاطع (*CCF*)

شکل ۶ همبستگی متقاطع بین شاخص‌های مورد مطالعه به صورت هم‌زمان و شش ماه تأخیر را نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، بالاترین ضریب همبستگی بین شاخص‌ها در حالت هم‌زمان در مقیاس ۴۸ ماهه مشاهده گردید، به طوری که ضریب همبستگی متقاطع هم‌زمان شاخص‌ها در مقیاس ۴۸ ماهه به ترتیب ۱، ۱ و ۰/۵۳ می‌باشد. یعنی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت بم به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد

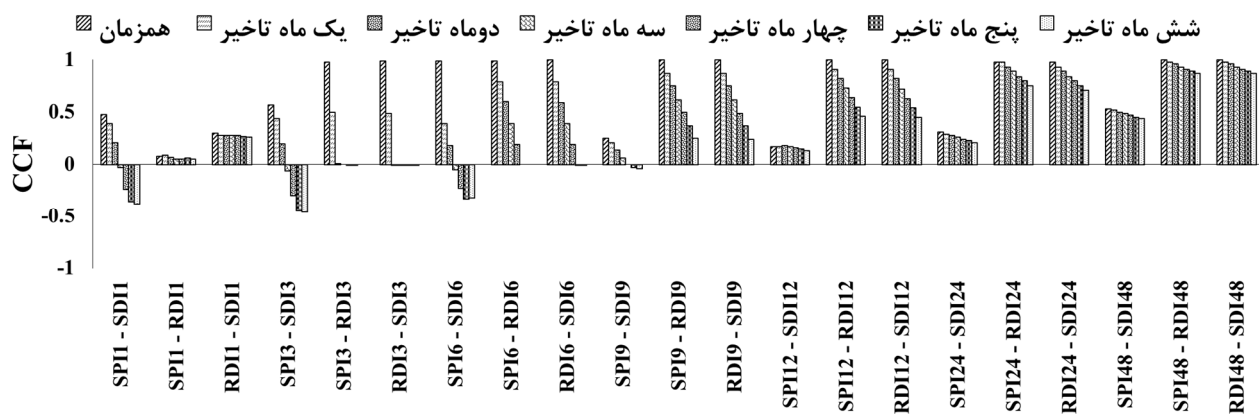
و بالاترین شباهت از نظر تخمین خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه است.

بررسی روند بین داده‌های هیدرواقليمی

جدول ۴ نتایج آزمون من-کندال را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده، $|z| < 1.96$ بوده و روند وجود ندارد. لذا افزایش دما و کاهش بارش و دبی معنی‌دار نیست و در واقع روند صعودی و نزولی معنی‌داری وجود ندارد.



شکل ۵- منحنی شدت- مدت- فراوانی در شاخص‌های الف (SPI)، ب (SDI)، ج (RDI)



شکل ۶- گراف همبستگی مقاطع بین شاخص‌های SPI و RDI، SDI به صورت همزمان و ۶ ماه تأخیر.

دارد. روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌های به‌وقوع پیوسته در طول دوره آماری در دشت بم نشان‌دهنده شروع دوره طولانی مدت خشکسالی هیدرولوژی از سال ۱۳۸۱ تا پایان دوره (سال ۱۳۸۹) در منطقه است، نتایج تحقیقات

نتایج این تحقیق نشان داد که مناسب‌ترین توزیع‌های آماری بر سری داده‌های بارش و دبی توزیع گاما است، که با نتایج مککی و همکاران (۱۹۹۳)، نلبنتیس و ساکاریس (۲۰۰۹) و تبوزاده و همکاران (۱۳۹۴) مشابهت

SPI-RDI است. بذرافشان و همکاران (۲۰۱۰) در مقایسه زوج شاخص‌های *SPI* و *RDI* در سواحل شمال و جنوب ایران گزارش دادند، نتایج تحلیل مشخصه‌های خشکسالی دو شاخص فوق به لحاظ آماری معنی‌دار نیست، که در تحقیق حاضر عکس این نتیجه اتخاذ گردید.

اربابی سبزواری و همکاران (۱۳۹۱) در استان کرمان حاکی از شروع دوره خشکسالی از سال ۱۳۸۰ به بعد است.

طبق نتایج حاصل از مقایسه جفتی سه شاخص *RDI*، *SPI* و *SDI* در پایش خشکسالی، بیشترین شباهت بین دو شاخص *RDI-SDI* و بیشترین تفاوت بین دو شاخص

جدول ۴- نتایج آزمون من کندال برای داده‌های هیدرواقليمی در دشت بم.

$Z_{cal} < 1/96$	<i>P-value</i>	آماره کندال- تائو	
۰/۲۳	۰/۰۳۴	۰/۰۶۸	دما
۰/۳۲	۰/۰۷۱	-۰/۰۶۳	بارش
۰/۳۴	<۰/۰۰۰۱	-۰/۲۲۷	دبی

دارای دوره بازگشتی ۲۰۰ ساله بوده که دارای بزرگی بیش از ۱۲۰ است (در هر شاخص). نتایج بررسی رابطه بین زوج شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد با افزایش مقیاس زمانی ضریب همبستگی آن‌ها افزایش می‌یابد به طوری که در سری زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه و هم‌زمان بسیار به هم نزدیک‌اند، بدان معنی که خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت بم به صورت هم‌زمان رخ می‌دهد که نشان‌دهنده وابستگی زیاد جریان رودخانه فصلی نرمایش به بارش باران در دشت بم است که با نتایج عزیزی (۱۳۸۲) در دشت قزوین، کرمی (۱۳۸۸) در دشت تبریز و بذرافشان (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز کرخه مبنی بر وجود تأخیر زمانی بین بارش و دبی همخوانی نداشته اما با تحقیق لشنی زند و همکاران (۱۳۹۱) مبنی بر همبستگی هم‌زمان بین دبی و بارش در حوضه سراب سید علی و تبوزاده و همکاران (۱۳۹۴) در رودخانه‌های فصلی حوضه آبخیز بختگان هم‌خوانی دارد. به نظر می‌رسد، علت عمده هم‌زمانی دو واقعه خشکسالی، تغذیه مستقیم رودخانه از بارش است. در مناطقی که بین مقادیر بارش و دبی چند ماه تأخیر وجود دارد، رودخانه‌ها دارای رژیم برفی، سازند کارستی و یا از چشمه تغذیه می‌شوند. در بررسی روند داده‌های هیدرواقليمی با

لذا به نظر می‌رسد نتایج پایش هر شاخص خشکسالی متأثر از عوامل اقلیمی اثرگذار بر منطقه متفاوت است. بدین معنی که عوامل اثرگذار بر خشکسالی در دشت بم با شرایط اقلیمی فراخشک سبب پایشی متفاوت از دو شاخص *SPI* و *RDI* شده است. همچنین با بررسی منحنی‌های شدت- مدت و فراوانی تهیه شده برای ایستگاه‌های منطقه مشخص شد که وقوع خشکسالی با تداوم‌های یک تا سه ماهه، پدیده‌ای معمول و بازگشت‌کننده است، بدین معنی که شدیدترین خشکسالی‌ها، تداومی کمتر از سه ماه داشته‌اند. با افزایش مقیاس زمانی و دوره بازگشت در ایستگاه‌ها، تداوم و بزرگی خشکسالی افزایش می‌یابد. تداوم‌های طولانی‌تر و بزرگی‌های بالاتر احتمال وقوع کم‌تر و یا دوره بازگشت-های طولانی‌تری دارند که با نتایج فرج‌زاده اصل (۱۳۷۴) و تبوزاده (۱۳۹۴) هم‌خوانی دارد. نتایج بررسی احتمال وقوع بزرگی و تداوم خشکسالی در دوره بازگشت‌های ۲- ۲۰۰ ساله نشان داد که در خوشبینانه‌ترین حالت زمان تداوم خشکسالی حدود ۵ ماه با بزرگی ۳ در دشت بم به طول انجامیده است. براساس دسته منحنی‌های شدت- مدت و فراوانی خشکسالی با ده سال تداوم اخیر (از ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹) و تحلیل در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه،

افزایش بارندگی، می‌توان گفت شاخصی است که پایش را به صورت خوش‌بینانه انجام می‌دهد، بنابراین پیشنهاد می‌گردد، پس از بررسی کارآیی شاخص‌ها در منطقه و در واقع بومی‌سازی آن‌ها، اقدام به بررسی پدیده مهمی هم‌چون خشکسالی پرداخت، چرا که بزرگ و یا کوچک شمردن آن دارای تبعات اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بوده و از این مهم می‌توان به مدیریت صحیح منابع آب در منطقه پرداخت.

همچنین در پایان پیشنهاد می‌گردد، از آنجایی‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک میزان تبخیر چندین برابر بارش است و دما نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات تبخیر و تعرق دارد، بنابراین جهت پایش و مدیریت خشکسالی به جای شاخص پرکاربرد *SPI* از شاخص *RDI* استفاده گردد تا بتوان اثر دما را به‌عنوان عامل مستقیم اثرگذار بر خشکسالی این مناطق در مدیریت دخیل نمود.

استفاده، متغیرهای دبی جریان، دما و بارش از لحاظ آماری دارای روند معنی‌دار مشخصی نبوده اما به‌طورکلی، شیب دما مثبت، شیب دبی منفی و روند تغییرات باران در دشت بم ثابت است، اگر چه طی سالیان متمادی در دشت بم کاهش باران مشهود بوده است، اما این کاهش به لحاظ آماری معنی‌دار نیست و به‌نظر می‌رسد عامل خشکسالی‌های اخیر تغییر روند در سایر عوامل اقلیمی مانند دمای بیشینه و متوسط، مقادیر تبخیر و تعرق، کاهش درصد رطوبت هوا، تغییر زاویه تابش خورشید و یا عوامل انسانی است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که در مجموع اگر چه شاخص *SPI* به سفارش مککی و همکاران (۱۹۹۳) شاخص بسیار ساده‌ای است، که نیاز به داده‌های پیچیده‌ای ندارد، اما با توجه به حساسیت بالای آن به کاهش و

منابع مورد استفاده

- اربابی سبزواری الف، امیر عضدی ط، موغلی م و بیات م، ۱۳۹۱. بررسی پدیده خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص درصد نرمال در استان کرمان با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، جلد ۵، شماره ۱۷، صفحه-های ۱۳ تا ۲۶.
- اقتدارنژاد م، ۱۳۹۴. بررسی تأثیر خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت بم). پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.
- بذرافشان ا، ۱۳۹۱. پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژی با استفاده از پیوند از دور و مدل‌های هوشمند، مطالعه موردی: حوضه آبخیز کرخه. رساله دکتری تخصصی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- بذرافشان الف، چشم براه ع و حلی‌ساز ا، ۱۳۹۴. مطالعه روند تغییرات تبخیر از تشتک در نمونه‌های اقلیمی استان هرمزگان. مجله علمی- ترویجی حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی، جلد ۴، شماره ۲، صفحه‌های ۱۷۱ تا ۱۷۶.
- تبوزاده ش، زارعی ح و بذرافشان ا، ۱۳۹۴. تحلیل شدت، مدت، فراوانی و گستره خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز بختگان. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۸، شماره ۴، صفحه‌های ۱۰۹ تا ۱۲۳.
- حسینی ب، دین پژوهی و نیکبخت ج، ۱۳۹۴. تحلیل خشکسالی‌های شمال غرب ایران با روش شاخص اکتشاف خشکسالی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۹، شماره ۲، صفحه‌های ۲۹۵ تا ۳۱۰.
- خزائی م و نجفی س، ۱۳۹۰. بررسی و مقایسه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مطالعه موردی: حوضه‌های آبخیز کهکیلویه و بویر احمد. صفحه‌های ۱۱ تا ۱۹. هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۷-۸ اردیبهشت ماه، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- عزیزی ق، ۱۳۸۲. ارتباط خشکسالی‌های اخیر و منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین. مجله پژوهش‌های جغرافیایی، جلد ۳۵، شماره ۴۶، صفحه‌های ۱۳۱ تا ۱۴۳.

- فرج زاده اصل م، ۱۳۷۴. تحلیل و پیش‌بینی خشکسالی در ایران، رساله دکتری تخصصی اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تربیت مدرس.
- کرمی ف، ۱۳۸۸. ارزیابی ارتباط خشکسالی هواشناسی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت تبریز. نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، جلد ۱۶، شماره ۳۷، صفحه‌های ۱۱۱ تا ۱۳۱.
- لشنی زند م، پروانه ب، پیامی ب و سپهوند ع، ۱۳۹۱. بررسی تطابقی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه سراب صید علی. فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، جلد ۹، شماره ۲۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۱.
- Alley WM, 1984. The palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 (7): 1100-1109.
- Bazrafshan J, Hejabi S and Habibi Nokhandan M, 2010. Is the SPI sufficient for monitoring meteorological droughts in extreme costal climates of Iran? *Advances in Natural and Applied Sciences* 4(3): 345-351.
- Bazrafshan O, Salajegheh A, Bazrafshan J, Mahdavi M and Fatehi Maraj A, 2015. Hydrological drought forecasting using ARIMA models (case study: Karkheh basin). *ECOPERSIA* 3(3):1099-117.
- Ben-Zvi A, 1987. Indices of hydrological drought in Israel. *Journal of Hydrology* 92:179-191.
- Chang PY, Hao E and Patt YN, 1997. Target prediction for indirect jumps. In *ACM SIGARCH Computer Architecture News* 25(2): 274-283.
- Chen Z, Grasby S and Osadetz KG, 2004. Relation between climate variability and groundwater level in the upper carbonate aquifer southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology* 290: 43-62.
- Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA and Vanyarkho OV, 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80:429-438.
- Kendall MG, 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin Book Series, London.
- Kisi O, 2015. An innovative method for trend analysis of monthly pan evaporations. *Journal of Hydrology* 527: 1123-1129.
- Mann HB, 1945. Nonparametric tests against trend. *Journal of the Econometric Society* 13: 245-259.
- McKee TB, Doesken NJ and Kleist J, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Pp 179-184. In *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*. 17-22 January, Anaheim, California.
- Mendicino G, Senatore A and Versace P, 2008. Groundwater resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology* 357: 282-302.
- Mishra AK and Desai VR, 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environment Research Risk Assessment* 19: 326-339.
- Nalbantis N and Tsakiris G, 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management* 23: 881-897.
- Pashiardis S and MicHaelides S, 2008. Implementation of the standardized precipitation index (SPI) and the reconnaissance drought index (RDI) for regional drought assessment: A case study for Cyprus. *European Water* 23 /24:57-65.
- Shafer BA and Dezman L E, 1982. Development of surface water supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snow-pack runoff areas. Pp 1-31. *Annual Western Snow Conference*. 28 June, Reno, USA.
- Shiau JT and Shen HW, 2001. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127: 30-40.
- Shukla S and Wood AW, 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysics Research Letter* 35: 1-8.
- Tigkas D, Vangelis H and Tsakiris G, 2012. Drought and climate change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment* 440: 33-41.
- Tsakiris G and Vangelis H, 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water* 9(10):3-11.
- Tsakiris G, Pangalou D and Vangelis H, 2007. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resource Management* 21: 821-833.
- Zelenhasic E and Salvai A, 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research* 23(1):156-168.