

EXTENDED ABSTRACT

Adaptive Evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in Analyzing the Trend of Intensity, Duration, and Frequency of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran

O. Bazrafshan^{1*}, F. Mahmoudzadeh², A. Asgarinezhad³, and J. Bazrafshan⁴

- 1* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Natural Resource Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abass, Iran (*O.bazrafshan@Hormozgan.ac.ir*).
- 2- M.Sc. Graduate of Natural Resource Engineering, Department of Natural Resource Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abass, Iran.
- 3- M.Sc. Graduate of Natural Resource Engineering, Department of Natural Resource Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abass, Iran.
- 4- Associate professor, Department of Agrometeorology, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: 29 May 2017

Received: 28 October 2017

Accepted: 1 November 2017

Keywords: Drought Characteristics, Evapotranspiration, Trend Analysis, Sub-Climates.

DOI: 10.22055/jise.2017.22113.1585.

Introduction

Drought is one of the most important weather-induced phenomena which may have severe impacts on different areas, such as agriculture, economy, energy production, and society. From a meteorological point of view, drought can be induced by lack of precipitation, hot temperatures, and enhanced evapotranspiration. The efficiency of the drought monitoring system depends on the index which is selected based on the drought and climate conditions of the region. Precipitation-based drought indices, including the Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993), China Z Index (CZI), (Percent of Normal Index) PNI, and others cannot identify the role of the temperature increase in the drought condition and in addressing the consequences of climate change. Recently, two new standardized drought indices have been proposed for drought analysis on multiple time scales: the Reconnaissance Drought Index (RDI) (Tsakiris and Vangelis, 2005) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente Serrano et al., 2011). The objective of this study is to evaluate the characteristics of drought, according to SPEI, SPI, and RDI. In addition, this study evaluates trends in meteorological drought frequency, duration, and severity during the study period through a multi-indicator approach and at low rainfall regions of Iran, providing a complete picture of the areas that suffered frequent and severe droughts in the past periods. Moreover, this might push towards the development of better frameworks for drought assessment, adaptation, and mitigation, in a possibly drier future.

Materials and Methods

We computed all three indicators at monthly scales of 3, 6, 9, 12, 24, and 48, from 1996 to 2014. We fitted the cumulated precipitation by gamma distribution for the SPI, the cumulated difference P-PET by log-logistic distribution, and the cumulated ratio P/PET by log-normal distribution for the RDI, following the authors' approaches who originally presented such indicators. All the available data in the period 1996–2014 have been used to fit the distributions. Three indices of SPI (precipitation), RDI (precipitation and temperature), and SPEI (precipitation and temperature) have been used in this research to analyze the trend of intensity, duration, and frequency of the drought in

the arid and semi-arid regions of Iran. Twenty-five synoptic stations in the mentioned climate were selected and their drought characteristics (intensity, duration, and frequency) were estimated in each of the 8 sub-climates. Also, we analyzed the trend using the Mann-Kendall trend test. The MK test is a statistical non-parametric test that is used for trend analysis. The MK statistics take positive or negative values which lead to increasing or decreasing trend, respectively. The null hypothesis assumes that the ranked data are independently and identically distributed while the alternative hypothesis assumes.

Results and discussion

The Agreement Index (AI) between drought indices showed the highest and lowest agreement between SPI-RDI and SPI-SPEI. So, the Agreement Index was observed in extra-arid, extra-warm and extra-arid, extra-cold climates at 48-month scale with values of 1 and 0.14, respectively. In general, in all sub-mates, the agreement index increases with the rise in time scale from three to 48 months. Based on the results, drought trends in cold and dry climates are decreasing in both short (3-month) and long (48-month) time scales and are increasing in the warm and dry climates. The highest and lowest agreement indices (0.99 and 0.14) were observed between SPI-RDI and SPI-SPEI, respectively, in extremely warm, extremely dry and extremely cold, extremely dry climates. The relation of SPI-RDI and SPEI-RDI in the magnitude and duration of the drought in cold climates is mostly weak and negative, and in the warm climates (0.32 and -0.06), the highest correlation was observed in extremely warm, extremely dry climate (0.98). Exploring the correlation of indices in the estimation of the drought frequency revealed that the lowest correlation was observed between coupled indices of SPI-SPEI and SPEI-RDI in cold, extremely dry and cold, moderately dry climates (0.39 and 0.34, respectively) and the highest correlation (0.99) was observed between coupled indices of SPI-RDI. The trend of intensity, duration, and frequency of the drought using the Mann-Kendal test showed that the increasing trend of the drought is increasing in dry and warm climates and decreasing (more than -2.61) in cold and dry climates, and that the SPEI index estimated the trend with a more intensity (more than +2.61).

Conclusion

In this research possible similarities/differences among SPI, RDI, and SPEI meteorological drought indices were investigated by a rather comprehensive comparability analysis, using data from different climatic zones. The comparison of the results in the trend analysis of the drought showed the same trend, but the SPEI index compared to the other indicators, showed a quicker response to changes in arid-warm climates. While SPI-RDI variations showed similar values in cold climates. The SPEI is based on precipitation and temperature data, and it has the advantage of combining multi-scalar character with the capacity to include the effects of temperature variability in the drought assessment. Thus, we recommend SPEI, as a suitable index for studying and identifying the effect of climate change on drought conditions.

Acknowledgement

The authors hereby thank the cooperation from the I.R of Iran Organization in conducting this research.

References

- 1- 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, 17(22), pp. 179-17.
- 2- Tsakiris, G. and Vangelis, H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. European Water, 9(10), pp. 3-11.

- 3- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Drumond, A., Gimeno, L., Nieto, R., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Beguería, S. and Zabalza, J., 2011. Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula (1930– 2006). *Climate Research*, 48(2-3), pp.203-212.



© 2019 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقایسه تطبیقی شاخص‌های SPI، RDI و SPEI در تحلیل روند شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران

ام‌البنین بذرافشان^۱، فوزیه محمودزاده^۲، امین عسگری‌نژاد^۳ و جواد بذرافشان^۴

^۱ - نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. O.bazrafshan@Hormozgan.ac.ir

^۲ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

^۳ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

^۴ - دانشیار گروه هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۱۰

بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۶

دریافت: ۱۳۹۶/۳/۸

چکیده

در این تحقیق، از شاخص‌های SPI، RDI و SPEI برای تحلیل روند شدت-مدت-فراوانی خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران استفاده گردید. تعداد ۲۵ ایستگاه سینوپتیک در اقلیم فوق‌با طول دوره مشترک آماری (۱۹۹۶-۲۰۱۴) انتخاب و شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی در هشت زیراقلیم برآورد گردید. نتایج نشان داد که روند خشک‌سالی از مقیاس کوتاه مدت (سه ماهه) تا بلندمدت (۴۸ ماهه) در اقلیم‌های سرد و خشک رو به کاهش و در اقلیم‌های گرم و خشک رو به افزایش است. بیشترین و کمترین توافق (با مقدار $+۰/۹۹$ و $+۰/۱۴$) بین دو شاخص SPI-RDI و SPEI-RDI به ترتیب در اقلیم فراگرم فراخشک و فراسرد فراخشک در مقیاس ۴۸ ماهه مشاهده گردید. رابطه SPI-RDI و SPEI-RDI نیز در بزرگی و تداوم خشک‌سالی در اقلیم‌های سرد در اغلب موارد ضعیف و منفی (با مقدار $+۰/۳۲$ و $-۰/۰۶$) و در مورد اقلیم‌های گرم، بیشترین هم‌بستگی در اقلیم فراخشک فراگرم ($+۰/۹۸$) بین SPEI-RDI مشاهده گردید. در بررسی هم‌بستگی شاخص‌ها در برآورد فراوانی خشک‌سالی، کمترین هم‌بستگی بین زوج شاخص SPEI-RDI و SPEI-RDI در اقلیم‌های فراخشک سرد و سرد نیمه‌خشک ($+۰/۳۹$ و $+۰/۳۴$) و بیشترین مقادیر هم‌بستگی بین زوج شاخص SPI-RDI ($+۰/۹۹$) مشاهده گردید. روند شدت-مدت-فراوانی خشک‌سالی با استفاده از آماره من-کندال نشان می‌دهد که روند خشک‌سالی در اقلیم‌های گرم و خشک رو به افزایش (بیش از $-۲/۶۱$) و در اقلیم‌های سرد و خشک رو به کاهش (بیش از $+۲/۶۱$) است. SPEI مقدار روند را با شدت بیشتری برآورد نموده است.

کلیدواژه‌ها: مشخصه‌های خشک‌سالی، تبخیر و تعرق، تحلیل روند، زیراقلیم.

مقدمه

می‌توانند برای پایش تغییرات اقلیمی دوره‌های فعلی و آتی نیز به کار روند.

در زمینه شاخص SPI، RDI، SPEI مطالعات متعددی صورت پذیرفته که به بعضی از آن‌ها اشاره خواهد شد. از جمله مطالعات انجام گرفته در این رابطه می‌توان به (Tsakiris et al., 2007)؛ (Brown و Burke، 2008)؛ (Michaelides و Pashiardis، 2008)؛ (Bazrafshan et al.، 2010)؛ (Visente-Serrano et al.، 2010)؛ (Khalili و Banimahd، 2012)؛ (Tigkas et al.، 2010)؛ (Zare Abyaneh et al.، 2013)؛ (Ahmadi et al.، 2013)؛ (Sobhani et al.، 2015)؛ (Tajbakhsh et al.، 2015)؛ (Rezaei et al. و Taboozadeh et al.، 2015)؛ (2016) اشاره نمود.

در مناطق حساس خشک و نیمه‌خشک، کمبود بارندگی اثرات شدیدی بر منابع آب می‌گذارد و در اغلب موارد خشک‌سالی‌های اقلیمی به وقوع سایر انواع خشک‌سالی منتهی می‌شوند (Bazrafshan et al., 2017). کارایی 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 ابداع شده (Mendicino et al., 2008) که بارش و تبخیرتعرق، دو متغیر مهم و ضروری برای پایش خشک‌سالی‌های هواشناسی می‌باشند (Blenkinsop and Fowler., 2007). از این رو شاخص‌هایی که علاوه بر بارش، مقدار تبخیرتعرق را نیز در نظر می‌گیرند،

به چند متغیر است، به نظر می‌رسد در کنار عامل بارش، می‌توان عامل تبخیرتفرق را به‌ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک لحاظ کرد. مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در بررسی خشک‌سالی اقلیمی، کمتر تحقیقی به مقایسه مشخصه‌های شدت، مدت و فراوانی سه شاخص SPI، RDI و SPEI پرداخته و ارتباط زمانی آنها را در مقیاس زمانی سه تا ۴۸ ماهه و پهنه‌بندی روند آنها با روش من-کندال بررسی کرده باشد. لذا در تحقیق حاضر، به تحلیل تأثیر تبخیرتفرق بر خشک‌سالی براساس سه شاخص SPEI، RDI و SPI در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، با شرایط متفاوت آب و هوایی، پرداخته می‌شود تا رفتار سه شاخص را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بررسی گردد و مؤثرترین و کاراترین شاخص در پایش و تحلیل خشک‌سالی با توجه به گرمایش جهانی و اثر وارد کردن مؤلفه دما و تبخیرتفرق در پایش خشک‌سالی معرفی گردد.

مواد روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران در ۸ زیراقلیم (دسته‌بندی اقلیمی دومازن اصلاح شده (Rahimi et al., 2013))، با استفاده از داده‌های ماهانه بارش و دمای هوا در ۲۲ ایستگاه سینوپتیک در دوره مشترک ۲۰۱۴-۱۹۹۶، صورت پذیرفت (شکل ۱). بر مبنای دسته‌بندی اقلیمی فوق، ایستگاه‌های مورد بررسی شامل اقلیم‌های شامل سرد و خشک، سرد و نیمه‌خشک، فراخشک سرد، فراخشک معتدل، فراخشک گرم و فراگرم و فراخشک و نیمه‌خشک معتدل است (جدول ۱).

RDI از مشابهت رفتاری بالایی با SPI برخوردار بوده، اما شاخص RDI حساس به تغییرات محیطی است و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد (Vangelis و Tsakiris 2005) اما ضعف عمده RDI این است که نسبت بارش به تبخیرتفرق وقتی مقدار تبخیرتفرق برابر صفر شود (در ماه‌های فصل زمستان در مناطق مختلف دنیا) تعریف نشده است و دامنه‌ی مقادیر نسبت به‌کار رفته به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک می‌باشد که نمی‌تواند نقش دما را منعکس سازد. از طرفی، دو شاخص خشک‌سالی SPI و SPEI، نیز در اقلیم‌هایی که تفاوت چندانی بین تغییرات دما و بارش وجود ندارد، مشابه هستند (Visente-Serrano et al., 2010). شاخص SPEI پاسخ سریع‌تری نسبت به خشک‌سالی داشته است. زیرا به دلیل لحاظ نمودن بیلان آب، هم‌بستگی قابل‌قبولی با میزان رطوبت خاک دارد (Ahmadi et al., 2013). عامل تبخیرتفرق، نقش مؤثرتری در تغییر شدت خشک‌سالی دارد. به‌گونه‌ای که با وجود افزایش (کاهش) بارش در مقایسه با میانگین بلندمدت، شدت خشک‌سالی افزایش (کاهش) یافته است و شاخص فوق توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیرتفرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، دارد (Zare (Abyaneh et al., 2015)).

مهم‌ترین عامل ایجاد خشک‌سالی بارندگی می‌باشد، اما افزایش و یا کاهش دما و به تبع آن تبخیرتفرق می‌تواند شدت خشک‌سالی را تشدید و یا تعدیل نماید. شاخص‌های متعددی ابداع گردیده که عموماً مبتنی بر بارندگی و یا بارندگی و تبخیرتفرق هستند و از طرف دیگر پایش خشک‌سالی براساس شاخص‌های متفاوت، قطعاً نتایج متفاوت در بر خواهد داشت. بنابراین، از آنجا که خشک‌سالی پدیده‌ای وابسته



Fig. 1-Sinoptic stations in low-rainfall regions of Iran

شکل ۱- ایستگاه‌های سینوپتیک در مناطق کم باران ایران

جدول ۱- مشخصات آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1- Descriptive statistics for selected stations

Station	Elevation (m)	Precipitation (mm)	Temperature	Climate by extended De Martonne
Esfahan	1550	129	17.57	
Birjand	1491	165	16.34	
Tehran	1190	242	17.57	
Sabzevar	972	198	17.78	
Semnan	1127	143	18.3	Arid - cold
Shahrud	1349	163	14.71	
Kerman	1753.8	132	17.16	
Qom	1550	130	16.13	
Arak	1708	327	16.13	
Torbat Heydarieh	1450	268	14.66	Semi arid- cold
Mashhad	999	256	14.36	
Zahedan	1370	79	18.81	
Tabas	711	82	22.49	
Kashan	982.3	136	19.72	Extra arid- cold
Yazd	1327.2	51	19.67	
Bam	1066.9	56	23.44	
Zabul	489	56	22.57	Extra arid- moderate
Abadan	6.6	160	30.50	
Iranshahr	591	129	25.39	Extra arid- warm
Bandar Abbas	10	172	26.97	
Bandar Lengeh	22	134	27.70	
Jask	5	140	26.53	Extra arid - extra warm
Bushehr	9	250	24.59	
Shiraz	1484	320	17.79	Arid- warm
Fasa	1288	288	20.01	Semi arid- moderate

که P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر تعرق پتانسیل، D اختلاف آن ها و i شماره‌ی ماه مورد نظر است. پس از محاسبه‌ی مقادیر D، از رهیافتی همانند شاخص بارش استاندارد (SPI) برای محاسبه SPEI استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا مجموع مقادیر متوالی سری D در پنجره‌های زمانی مختلف محاسبه و در مرحله‌ی بعد یک توزیع احتمال لوگ-لجستیک سه پارامتری بر سری X برازش می‌باید و مقدار SPEI استخراج می‌گردد (Visente-Serrano et al., 2011).

شاخص خشک‌سالی احيایی RDI

شاخص فوق اولین بار برای مناطق مدیرانه‌ای پیشنهاد گردید (Tsakiris and Vangelis., 2005). جهت محاسبه‌ی این شاخص، ابتدا با استفاده از نسبت بارندگی (P) به تبخیر تعرق پتانسیل (PET) مقادیر اولیه α_0^i برای هر بازه زمانی دل‌خواه یا سال‌های مختلف براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\alpha_0^i = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{i,j}}, i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,12 \quad (3)$$

شاخص بارش استاندارد شده

این شاخص اولین بار توسط McKee et al (1993) ارائه گردید که در آن سری‌های زمانی در مقیاس i ماهه (۴۸، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰) با توزیع آماری گاما برازش داده شده و متغیر تصادفی SPI مربوط به هر مقدار بارندگی در سطوح هم‌احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال استخراج می‌گردد.

شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد

شاخص بارش- تبخیر تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) Visente-Serrano et al (2011) به‌عنوان یک شاخص خشک‌سالی اقلیمی معرفی گردید. این شاخص مبتنی بر محاسبه‌ی بیلان آب اقلیمی است. معادله‌ی ترازمندی آب اقلیمی به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (2)$$

بین سایر شاخص‌ها بود که علاوه بر بارش، تبخیرتقرق را نیز در نظر می‌گیرند (Bazrafshan and Hejabi, 2016).

ضریب هم‌بستگی کندال - تائو بی

ضریب هم‌بستگی رتبه‌ای کندال تائو-بی، یک آماره ناپارامتری است که برای سنجش میزان تناظر یا مطابقت بین دو مجموعه رتبه (یعنی، دو متغیر رتبه‌بندی شده به صورت صعودی) و ارزیابی معنی‌داری این تناظر به کار می‌رود (Knight, 1996). آماره آن به طور کلی، مطابق رابطه (۶) است.

$$r_s = \frac{n_c - n_d}{\sqrt{(T_0 - T_1)(T_0 - T_2)}} \quad (6)$$

که T_0 ، T_1 و T_2 به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$T_0 = \frac{n(n-1)}{2} \quad (7)$$

$$T_1 = \sum_k \frac{t_k(t_k-1)}{2} \quad (8)$$

$$T_2 = \sum_l \frac{u_l(u_l-1)}{2} \quad (9)$$

که t_k تعداد گره‌های مقادیر x در گروه k ام، u_l تعداد گره‌های مقادیر y در گروه l ام، n تعداد مشاهدات، n_c تعداد جفت‌های هم‌سان (موزون) و n_d تعداد جفت‌های ناموزون است. ذکر این نکته لازم است که وقتی سری داده‌های x و y مرتب می‌شوند ممکن است اعداد یکسانی در سری وجود داشته باشند که در سری مرتب شده پشت سر هم قرار بگیرند. در نتیجه، به این اعداد یکسان متوالی نمی‌توان رتبه‌های مختلف داد و یک یا چند گره ایجاد می‌شود. تعداد این گره‌ها تشکیل گروه گره‌ها و هر گره شامل دو یا چند یکسان متوالی است. منظور از جفت‌های هم‌سان، تعداد حالاتی است که رتبه اعداد در سری مرتب‌نشده (اولیه) x همسان با متغیر y باشد و جفت‌های ناهمسان، به زوج اعداد متغیر x و y در سری مرتب‌نشده (اولیه) گفته می‌شود که رتبه‌های نابرابر دارند.

در این رابطه $P_{i,j}$ و $PET_{i,j}$ به ترتیب مقادیر باران و تبخیرتقرق پتانسیل ماه z ام از سال i ام و N برابر تعداد سال‌های آماری است. روش پیشنهادی محاسبه تبخیرتقرق، روش تورنت‌وایت است (Tsakiris and Vangelis, 2005).

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

$$RDI_n^i = \frac{\alpha_0^i}{\bar{\alpha}_0} - 1 \quad (4)$$

در این رابطه $\bar{\alpha}_0$ میانگین حسابی مقادیر α_0^i در سال‌های مورد بررسی است که برابر با نسبت شاخص خشک‌سالی ارایه شده از سوی سازمان فائو است (Tsakiris et al., 2007).

مرحله سوم در محاسبه این شاخص تعیین مقادیر استاندارد شده (RDI_{st}) است که با فرض این که مقادیر α_0^i از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کنند، مقادیر α_0^i سال‌های مختلف مطابق با رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$RDI_s^i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (5)$$

در این رابطه y_i برابر است با $\ln \alpha_0^i$ و \bar{y} و σ_y به ترتیب میانگین حسابی و انحراف معیار مقادیر y_i است. طبقه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی مورد استفاده در جدول (۲) آمده است.

شاخص‌های خشک‌سالی مورد استفاده از نظر متغیرهای هواشناسی مورد نیاز، متفاوت هستند، در عین حال، اساس آماری آن‌ها یکسان است. بدین معنی که داده‌ها بر توزیع مناسب، برازش داده شده و سپس مقادیر هم‌احتمال تجمعی از توزیع مناسب به توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌گردد. در این تحقیق، معیار اصلی محاسبات خشک‌سالی، سنجه‌هایی هستند که مبتنی بر دو متغیر بارندگی (SPI) و تبخیرتقرق (SPEI و RDI) هستند. در این بین، به دلیل ساده و سهل‌الوصول بودن متغیر مورد استفاده در SPI شاخص فوق مبنای ارزیابی دیگر شاخص‌هاست (Mishra and Desai, 2005). لذا هر قدر میزان هم‌بستگی دو شاخص SPEI و RDI به SPI بیشتر باشد، شاخص SPI می‌تواند به عنوان سنجه مناسب برای پایش خشک‌سالی برای اقلیم مورد نظر معرفی گردد و هر قدر هم‌بستگی شاخص‌های مذکور با SPI ضعیف‌تر باشد، باید به دنبال انتخاب شاخص مناسب

جدول ۲- طبقه‌بندی SPI، SPEI و RDI

Table 2- Drought classification based on SPI (SPEI and RDI) values

SPI values	Category
SPI (JDI) >2	Extremely wet
1.5 < SPI (JDI) < 2	Severe wet
1 < SPI (JDI) < 1.5	Moderately wet
0.5 < SPI (JDI) < 1	Mild wet
-0.5 < SPI (JDI) < 0.5	Normal
0 < SPI (JDI) < -0.5	Mild drought
-1 < SPI (JDI) < -1.5	Moderately drought
-1.5 < SPI (JDI) < -2	Severe drought
SPI (JDI) < -2	Extremely drought

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

N تعداد داده‌ها، \bar{x}_i و x_j داده‌ها در سری زمانی و Z آماره تست استاندارد است (Kisi, 2015). با توجه به آزمون آماری دوطرفه کای اسکوتر، 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 (Bazrafshan et al., 2015).

نتایج و بحث

همبستگی شاخص‌ها و میزان توافقی آنها در پایش خشک-سالی

شکل (۲) همبستگی شاخص‌ها را در مقیاس زمانی بلندمدت ۴۸ ماهه در اقلیم سرد و خشک (الف) و فراگرم فراخشک (ب) نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده، مقدار همبستگی بین شاخص SPI-SPEI با افزایش مقیاس زمانی از ۳ به ۴۸ ماهه کاهش و بعضاً معکوس (مقدار همبستگی از ۰/۲۱ به -۰/۱۴) می‌گردد. حال آنکه در اقلیم فراخشک فراگرم، مقدار ضریب همبستگی بسیار کمتر است (۰/۱۶ تا -۰/۸۸). مقادیر فوق برای سایر اقلیم‌ها نیز به همین صورت است. همبستگی شاخص SPEI-RDI در اقلیم سرد و خشک مثبت و مقادیر در مقیاس ۳ تا ۱۲ افزایش و ۴۸ ماهه کاهش نشان می‌دهد. این حالت در در اقلیم فراخشک گرم نیز قابل مشاهده است. با این تفاوت که ضرایب همبستگی در اقلیم فراخشک فراگرم بیشتر است. همبستگی شاخص SPI-RDI نیز به همین شکل بوده اما میزان شاخص همبستگی به ترتیب در مقیاس ۱۲ ماهه در اقلیم سرد و خشک و فراگرم و خشک به ترتیب (۰/۶۱ و ۰/۹۹) تخمین زده شد.

۲- شاخص توافقی (Agreement Index)

این شاخص توسط Willmott (1981) پیشنهاد گردید که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$DA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{x}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \right] \quad (10)$$

که x_i و y_i متغیرهای جفتی مورد مقایسه، \bar{x} و \bar{y} میانگین مقادیر و n تعداد مشاهدات است.

تحلیل روند من - کندهال

آزمون فوق تست ناپارامتریک رتبه مینا جهت بررسی روند می‌باشد که توسط Mann (1945) و Kendall (1962) ارائه گردید.

مراحل محاسبه شامل محاسبه اختلاف بین تک‌تک مشاهدات با هم‌دیگر و استخراج پارامتر S به صورت رابطه (۱۱)، اعمال تابع علامت (رابطه ۱۲) و محاسبه واریانس توسط رابطه (۱۳) و محاسبه آماره Z با استفاده از رابطه (۱۴) است.

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (11)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (13)$$

می‌شوند (از نوسانات زیاد که در مقیاس‌های کم، مانند سه ماهه دیده می‌شود، در مقیاس‌های بزرگتر کاسته می‌شود) در نتیجه همبستگی‌ها افزایش می‌یابد (Kim et al., 2009). از طرفی کمترین میزان توافق بین شاخص‌ها بین دو شاخص SPI و SPEI مشاهده گردید. عموماً توافق شاخص‌ها در مناطق سرد و خشک کمتر و در اقلیم گرم و خشک بیشتر نشان داده. از دلایل اصلی شباهت بالای شاخص‌ها با هم در مناطق گرم و خشک، نقش مهم تأخیر در تشدید خشک‌سالی است که با نتایج Banimah و Khalili (2013) در نمونه‌های مختلف اقلیمی ایران مطابقت دارد.

میزان همبستگی دو شاخص در اقلیم فراهشک بالاتر برآورد شده است.

در بررسی میزان توافق بین شاخص‌ها، بالاترین و پایین‌ترین توافق بین دو شاخص SPI- RDI و SPI- SPEI به ترتیب در اقلیم فراهشک و فراسرد فراهشک در مقیاس ۴۸ ماهه با مقدار یک و ۰/۱۴ مشاهده گردید. بطور کلی در تمامی اقلیم‌ها میزان توافق بین شاخص‌ها با افزایش مقیاس زمانی از سه ماهه به ۴۸ ماهه افزایش یافت (شکل ۳). زیرا با افزایش مقیاس زمانی از سه ماهه به ۴۸ ماهه، سری‌های زمانی شاخص‌های مورد استفاده هموارتر

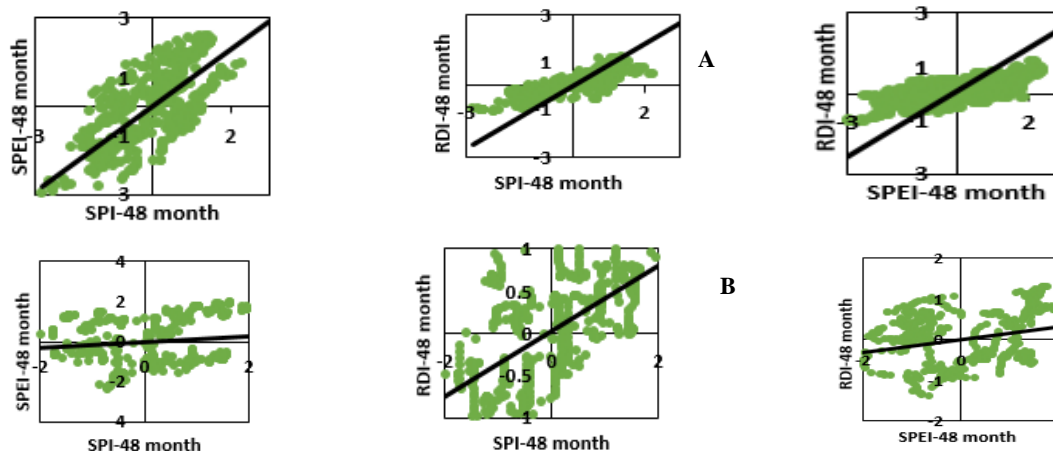


Table 2- Scatter plots of drought indices in (A: cold and arid climate (Isfahan), B: Extra arid and extra warm (Bandar Lengeh).

شکل ۲- نمودار پراکنش مقادیر شاخص‌های خشکسالی در (الف) اقلیم سرد و خشک (اصفهان)، ب: فراهشک (بندرلنگه)

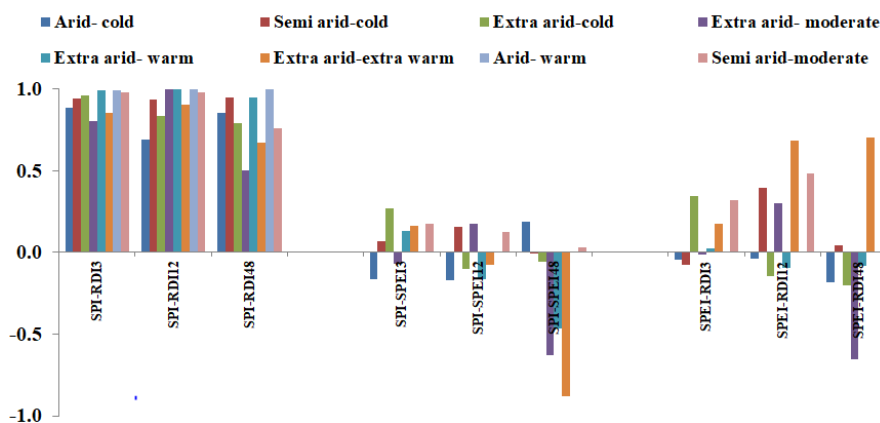


Fig. 3- Correlation coefficients in drought indices in different climates

شکل ۳- ضرایب همبستگی در شاخص‌های خشکسالی در اقلیم‌های مختلف

بررسی میزان توافق درصد فراوانی خشکسالی شاخص‌ها (شکل ۵)، نشان می‌دهد، شاخص SPI-SPEI در کلاس‌های ملایم، متوسط و شدید شباهت بالایی در عموم اقلیم‌ها داشته، این در حالی است که شاخص RDI با دو شاخص دیگر، کلاس‌های خشکسالی را در دسته شدید و خیلی شدید تخمین زده و شباهت کمتری به آن‌ها در تخمین درصد فراوانی دارد.

میزان توافق شاخص‌ها در مشخصه‌های خشکسالی

در بررسی میزان توافق بین بزرگی شاخص‌ها با ضریب کندال-تائو بی، پایین‌ترین و بالاترین توافق بین دو شاخص SPI- RDI و SPEI- SPEI به ترتیب در اقلیم فرا گرم فراخشک و فراسرد فراخشک در مقیاس ۲۴ ماهه مشاهده گردید (شکل ۴). چنین نتایجی توسط Morid et al. (2006) و Kim et al. (2009) نیز تایید گردیده است در مورد شدت خشکسالی نیز، چنین نتایجی حاصل گردیده است.

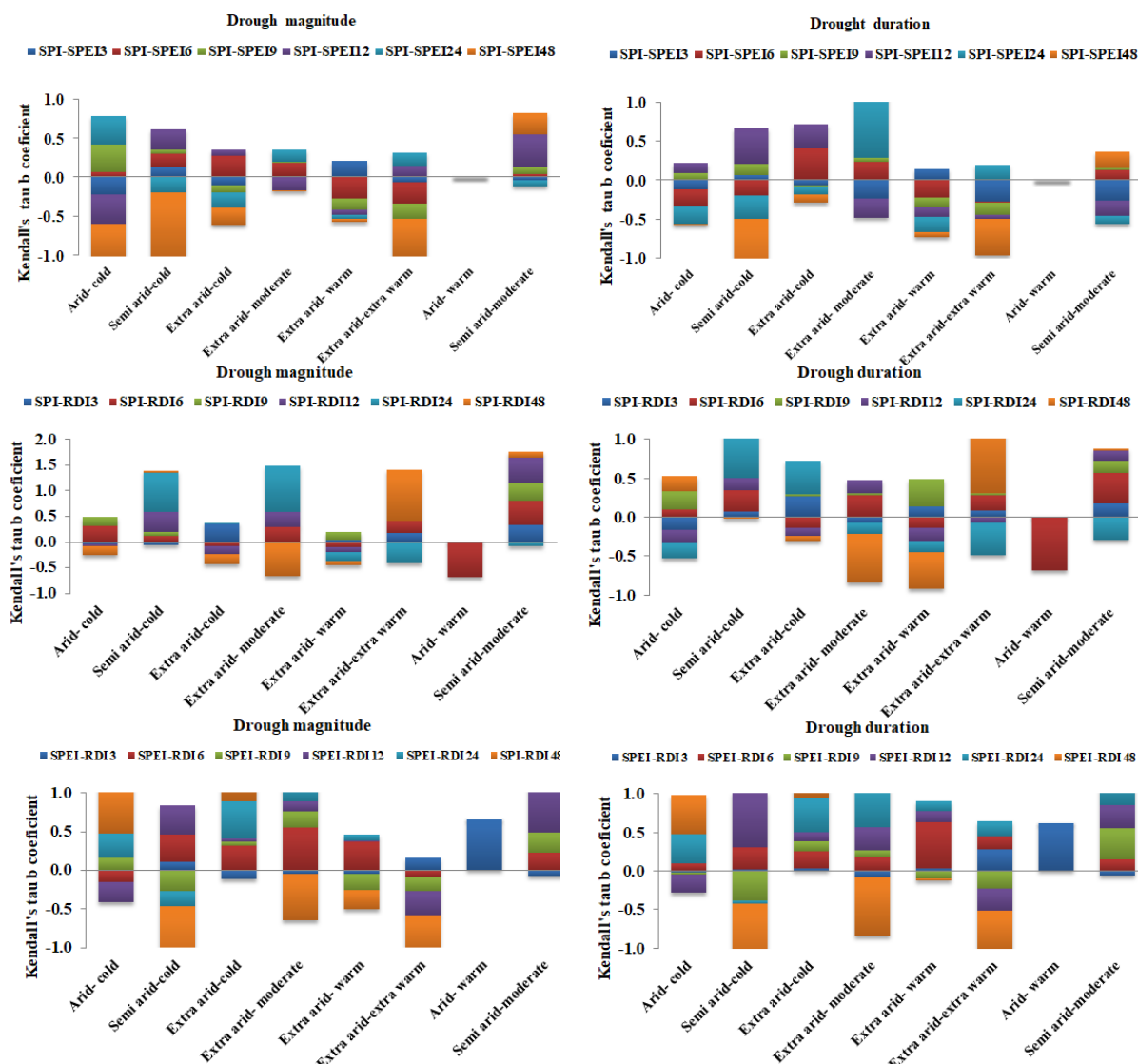


Fig. 4- Kendall's tau-b correlation coefficient in drought duration and magnitude

شکل ۴- ضریب همبستگی کندال تائو - بی بزرگی و تداوم خشکسالی

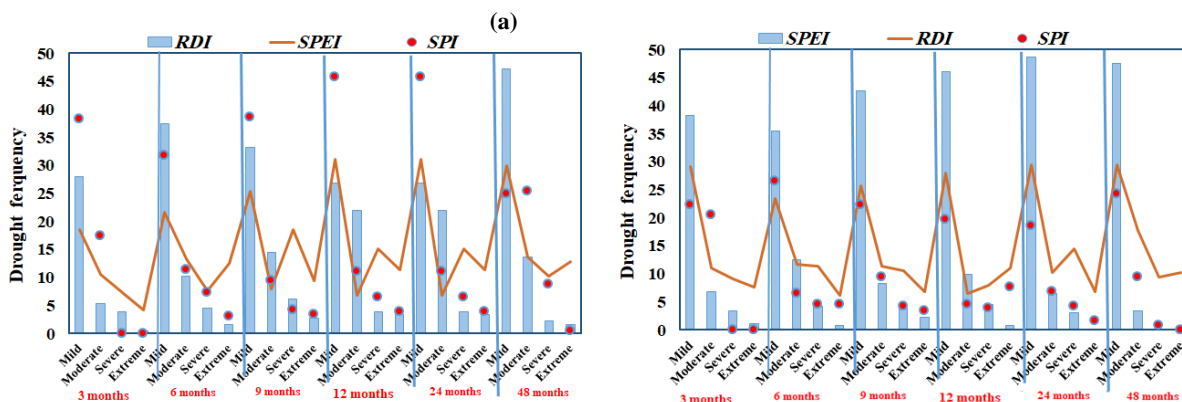


Fig. 5- Drought frequency of indices in arid-warm (a) and arid-cold (b)
شکل ۵- درصد فراوانی شاخص‌های خشک‌سالی در اقلیم گرم و خشک (الف) و اقلیم سرد و خشک (ب)

(2017) در بررسی روند خشک‌سالی در سواحل جنوبی ایران، روند فزاینده خشک‌سالی را در مقیاس‌های زمانی بلندمدت تایید نمود. پهنه‌بندی روند شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران در شکل (۶ ب تا د) نمایش داده شده است. در بررسی روند بزرگی خشک‌سالی در مقیاس ۴۸ ماهه در سه شاخص مورد بررسی، نتایج تحلیل نشان دهنده روند فزاینده شدت خشک‌سالی طی دوره مورد مطالعه در اکثر اقلیم‌ها به جز اقلیم نیمه‌خشک معتدل (شیراز و فسا) است که به لحاظ آماری، فاقد روند معنی‌دار است. همچنین نتایج نشان می‌دهد روند کاهش شدت خشک‌سالی از نیمه غربی رو به افزایش است که در هر سه شاخص این مسئله با تفاوت جزئی در گستره منطقه تحت خشک‌سالی، تأیید گردیده است. بیشترین مقادیر روند معنی‌دار شدت خشک‌سالی (چه روند افزایشی و چه کاهش) توسط شاخص SPEI در اقلیم‌های مختلف تخمین زده شد.

تحلیل روند تداوم خشک‌سالی نشان می‌دهد که تداوم خشک‌سالی طی دوره مورد مطالعه دارای روند کاهش بوده که در اغلب اقلیم‌ها این کاهش از نظر آماری بی‌معنی است. در بخش‌هایی از غرب روند منفی تداوم خشک‌سالی معنی‌دار برآورد گردید. در مشخصه تداوم خشک‌سالی نیز بیشترین مقادیر روند معنی‌دار زمان تداوم خشک‌سالی توسط شاخص SPEI در اقلیم‌های مختلف تخمین زده شده است. در بررسی روند فراوانی خشک‌سالی در اکثر اقلیم‌ها روند فراوانی منفی بوده و مقادیر برآوردشده در شاخص‌های مختلف با اختلاف ناچیزی در شاخص SPEI مشاهده گردید. همچنین در تمامی شاخص‌ها، با افزایش مقیاس زمانی، روند تحلیل کاهش یافت.

مقایسه شاخص‌ها در تحلیل روند شدت-مدت-فراوانی

شکل (۶-الف) روند خشک‌سالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده، مساحت تحت گستره روند فزاینده خشک‌سالی با افزایش مقیاس زمانی افزایش می‌یابد. بیشترین مقادیر آماره من‌کنندال مربوط به شاخص SPEI و در اقلیم فراگرم فراخشک، گرم و خشک و فراخشک گرم اتفاق افتاده است (به‌خصوص ایستگاه‌های در مناطق جنوبی‌تر). در این اقلیم‌ها نیز شاخص RDI مقادیر بیشتری را نسبت به SPI نشان می‌دهد. در مورد تحلیل روند خشک‌سالی، مقادیر دو شاخص SPEI-RDI مشابهت زیادی داشته با این تفاوت که مقادیر آماره در SPEI به مراتب بیشتر تخمین زده شده است، که دلیل آن را می‌توان به تغییرات بارندگی و منظور نمودن عنصر دما در این شاخص نسبت داد. اگرچه بارندگی نقش ویژه‌ای در تغییرات زمانی خشک‌سالی ایفا می‌نماید اما تأثیر دما، به‌ویژه در اقلیم‌های فراخشک و بیابان‌های گرم، معنی‌دار بوده و موجب تشدید پدیده خشک‌سالی و در نهایت موجب کاهش شدیدتر منابع آب می‌گردد که با نتایج محققینی چون (Sobhani et al. 2015)؛ (Nosrati 2014) و Banimahd و Khalili (2013) مشابهت دارد.

همچنین لازم به ذکر است که در برخی ایستگاه‌های شمالی واقع در اقلیم‌های سرد و خشک، سرد و نیمه خشک (اراک، تهران، شاهرود، سمنان) روند خشک‌سالی رو به کاهش بوده است. نتایج (Bazrafshan et al. 2017) نشان داد که روند خشک‌سالی در برخی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران رو به کاهش و روند بارش رو به افزایش است. همچنین Eghtedar Nezhad et al.

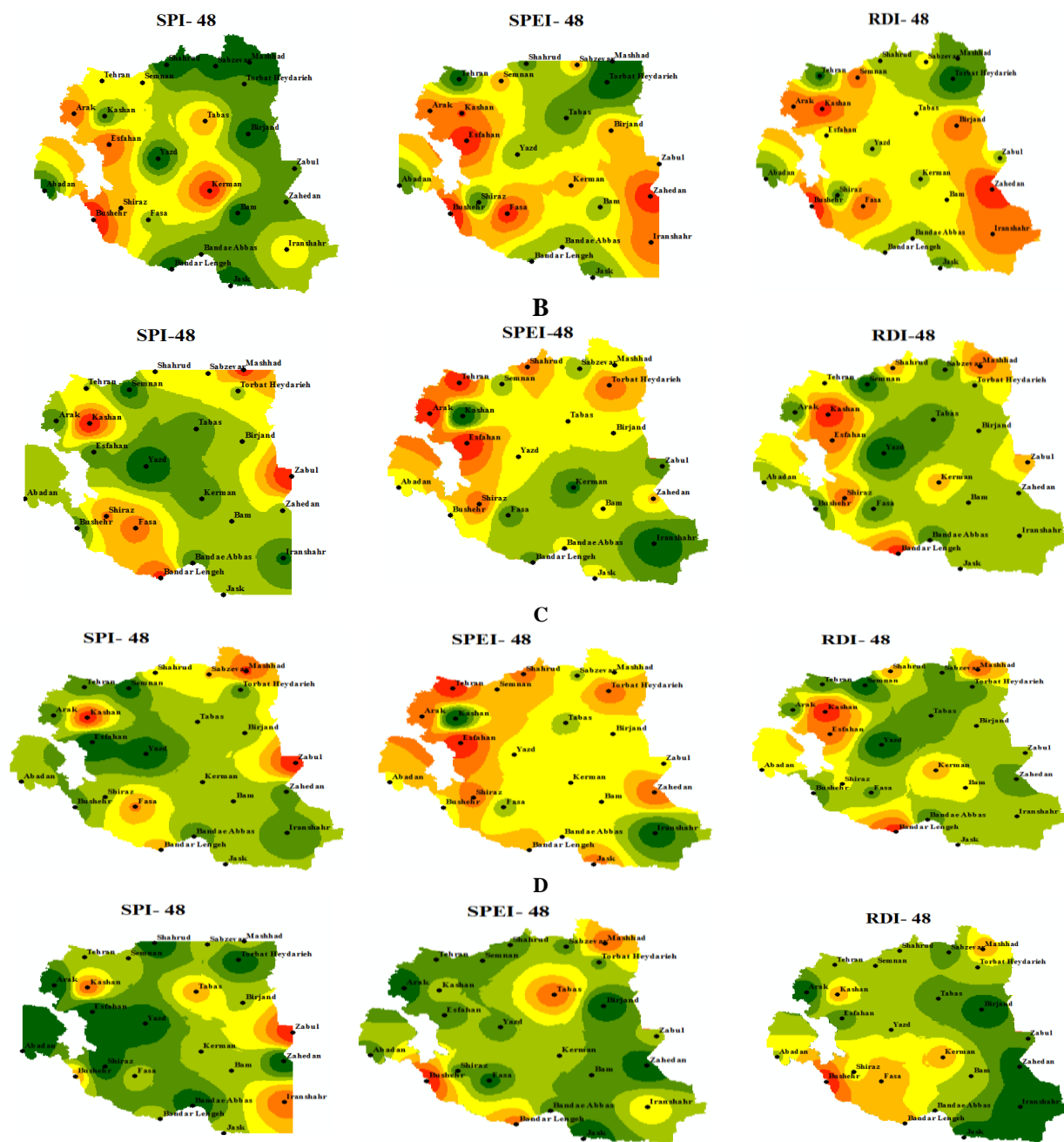


Fig. 6- Trend analysis in 48 months time scales using drought indices (a), magnitude (b), duration (c) and frequency (d)

شکل ۶- تحلیل روند در مقیاس ۴۸ ماهه با استفاده از شاخص های خشکسالی (الف)، بزرگی (ب)، مدت (ج) و فراوانی (د)

نتیجه گیری

همچنین تحلیل مکانی روند خشک‌سالی با استفاده از آزمون روند من - کندال طی دوره آماری در مناطق خشک و نیمه‌خشک نشان داد که روند خشک‌سالی در اغلب مناطق خشک و سرد (با مقدار $+۲/۶۱$) رو به کاهش و در اقلیم‌های گرم و خشک (با مقدار $-۲/۶۱$) رو به افزایش است که این شدت را شاخص خشک‌سالی SPEI در درجه اول و سپس RDI و SPI با شدت بیشتری نشان داد. نتایج این تحقیق نشان داد که در مجموع اگر چه شاخص SPI به عقیده McKee et al. (1993) شاخص بسیار ساده‌ای است، که نیاز به داده‌های پیچیده‌ای ندارد، اما با توجه به حساسیت بالای آن به کاهش و افزایش بارندگی، می‌توان گفت شاخصی است که پایش را به‌صورت خوش‌بینانه انجام می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که پس از بررسی کارایی شاخص‌ها در منطقه و در واقع بومی‌سازی آن‌ها، اقدام به بررسی پدیده مهمی همچون خشک‌سالی پرداخت، زیرا 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. در نهایت پیشنهاد می‌گردد که در اقلیم‌های گرم و فراخشک استفاده از SPI برای پایش خشک‌سالی کافی نیست و به دلیل نقش دما به‌عنوان عامل محدودکننده رطوبت و بالا بودن تبخیر-تعرق، استفاده از شاخص SPEI برای پایش مؤثر و دقیق خشک‌سالی‌ها استفاده شود. حال آنکه در اقلیم‌های خشک و سرد از شاخص SPI استفاده گردد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از همکاری سازمان هواشناسی کشور تشکر می‌کند.

تحقیق فوق با هدف معرفی شاخص کارا در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران بر مبنای سه شاخص SPI، SPEI و RDI صورت پذیرفت.

در اقلیم سرد و خشک، سرد و نیمه‌خشک و فراخشک فراسرد، بین زوج شاخص SPI-RDI همبستگی بالایی (با مقدار $۰/۹۹$) وجود دارد، عدم اختلاف بین RDI و SPI را می‌توان تعیین‌کننده نبودن تبخیر-تعرق در وقوع خشک‌سالی در اقلیم سرد دانست. در نتیجه شاخص SPI با در نظر گرفتن بارندگی به تنهایی توان لازم برای پایش خشک‌سالی را دارد.

در اقلیم فراخشک معتدل، فراخشک گرم، نیمه‌خشک معتدل، فراخشک فراگرم و گرم و خشک، میزان همبستگی بین SPI-SPEI و RDI-SPEI گاه منفی و یا بسیار کم (با مقدار $۰/۳۲$ تا $-۰/۰۶$) است، لذا شاخص SPEI سنج مناسبی برای اقلیم‌های مذکور معرفی می‌گردد. زیرا، علاوه بر در نظر گرفتن دو معیار بارش و تبخیر و تعرق، برآزش مقادیر به کمک یک توزیع سه پارامتری (لوگ لوجستیک سه پارامتری) صورت می‌گیرد و در نتیجه کنترل بهتری روی فرم توزیع خواهد داشت (Bazrafshan and Hejabi, 2016).

مقایسه نتایج سه شاخص در تحلیل روند فراوانی خشک‌سالی در کلاس‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی سه تا ۴۸ ماهه نشان داد که روند تغییرات سه شاخص در پهنه‌بندی مشابه، اما شاخص SPEI نسبت به دو شاخص دیگر در اقلیم‌های گرم و خشک، فرکانس بیشتری از خشک‌سالی و پاسخ سریع‌تری به تغییرات رطوبتی را نشان می‌دهد. حال آنکه تغییرات SPI-RDI مقادیر مشابهی را در اقلیم‌های سرد نشان داد.

References

- Ahmadi, M., Nosrati, K. and Selki, E., 2013. Drought and its relationship with soil moisture (Case study: Kabodar Abad, Isfahan). *Geography*, 11(38), pp. 77-91. (In Persian).
- Banimahd, S.A. and Khalili, D., 2013. Factors influencing Markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. *Water Resources Management*, 27(11), pp. 3911-3928.
- Bazrafshan, A., Chashmbrab, A. and Holisaz, A., 2015. Trend analysis of the pan evaporation in different climates of Hormozgan province. *Journal of Conservation and Utilization of Natural Resources*, 4(2), pp. 171-176.
- Bazrafshan, J. and Hejabi, S., 2016. Drought and methods of monitoring. *University of Tehran Press*, 234 pages. (In Persian).
- 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), PP. 345-351. (In Persian)

- 6- Bazrafshan, O., Mahmudzadeh, F., Bazrafshan, J., 2017. Evaluation of temporal trends of the drought indices SPI and SPEI in the Southern Coast of Iran. *Desert Management*, 4(8), pp. 54-69. (In Persian).
- 7- Blenkinsop, S. and Fowler, H.J., 2007. Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *Journal of Hydrology*, 342, PP. 50-71.
- 8- Burke, E.J. and Brown. S.J., 2008. Evaluating uncertainties in the projection of future drought. *Journal of Hydrometeor*, 9, PP. 292–299.
- 9- Eghtedar Nezhad, M., Bazrafshan, O., Sadeghi Lari, A., 2017. Adaptive Evaluation of SPI, RDI and SDI Indices in Analyzing the Meteorological and Hydrological Drought Characteristics (Case Study: Bam Plain). *Water and Soil Science*, 26(4.2), pp. 69-81. (In Persian)
- 10-Kendall, M.G., 1962. Rank correlation methods. *The British Psychological Society Publishing*, 220P.
- 11-Kim, D.W., Byun, H.R. and Choi, K.S., 2009. Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, 378, pp. 1–12.
- 12-Knight, W.E., 1996. A computer method for calculating Kendals Tau with ungrouped data. *J Am Stat Assoc* 61, pp. 436-439.
- 13-Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), pp. 245-259.
- 14-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*, 17(22), pp. 179-17.
- 15-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, pp. 282-302.
- 16-Mishra, A.K. and Desai, V.R., 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environment Research and Risk Assessment* 19, pp. 326-339.
- 17-Morid, S., Smakhtin, V.U. and Moghadasi, M., 2006. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int J Climatol*, 26, pp. 971–985.
- 18-Nosrati, K., 2014. Estimation of Standardized Evapotranspiration (SPEI) Index for Dry Dry Identification in Different Climates of Iran. *Quarterly Journal of Environmental Science*, Volume 12, Issue 4, pp. 63-74. (In Persian)
- 19-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), pp.57-65.
- 20-Rahimi, J. Ebrahimpour, M. and Khalili, A., 2013. Spatial changes of Extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 112, pp. 409-418.
- 21-Rezaei, H., Khanmohammadi, N., Montasari, M. and Bahmanesh, J., 2016. Investigating the effect of distribution function and estimation method of potential evapotranspiration in determination of dry matter identification index. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, Volume 40, Special Issue 1/1, pp. 167-183. (In Persian).
- 22-Sobhani, B., Ghafari Gilandeh, A. and Golghooust, A., 2015. Dry dryness in Ardebil province using the developed SPEI index based on fuzzy logic. *Journal of Applied Geosciences Research*, Vol. 15, No. 36, pp. 52-71. (In Persian).

-
- 23-Taboozadeh, Sh., Zarei, H. and Bazrafshan, A., 2015. Analysis of severity, duration, frequency and extent of meteorological precipitation in Bakhtegan watershed. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 109-123. (In Persian).
- 24-Tajbakhsh, S., Eisakhani, N., Fazl Kazemi, A., 2015. Assessment of meteorological drought in Iran using standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(2), pp. 313-321. (In Persian).
- 25-Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G., 2012. Drought and climate change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*, 1(44), pp. 33-41.
- 26-Tsakiris, G. and Vangelis, H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), pp. 3-11.
- 27-Tsakiris, G., Pangalou, D. and Vangelis, H., 2007. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resources Management*, 21, pp. 821-833.
- 28- Visente Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Drummond, A., Gimeno, L., Nieto, R., Morán-Tejeda, E., and Zabalza, J., 2011. Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula, (1930-2006). *Climate Research*, 48, pp. 203-212.
- 29-Visente-Serrano, S.M., Beguería, S. and , López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index, *Journal of Climate*, 23(7), pp. 1696-1718.
- 30-Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, pp. 184-194.
- 31-Zare Abyaneh, H., Ghabaei Sough, M. and Mosaedi, A., 2015. Drought monitoring based on Standardized Evapotranspiration Index (SPEI) under climate change. *Water and Soil Journal*, 29 (2), pp. 374-392. (In Persian).