Research Paper

A Review of Stationary and Non-Stationary Indices for Drought Monitoring in Iran and Other Countries

Sahar Delavar[1], Sedigheh Anvari[2*], Mohammad Najafzadeh [3], Farshad Fathian[4]

[1] Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
[2] Assisstant Prof., Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. (Corresponding Author).
[3] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
[4] Associate Professor, Department of Water Science & Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan.

10.22125/IWE.2023.404878.1729

Received:
July 2, 2023
Accepted:
October 18, 2023
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
GAMLSS, Drought Indices, Stationarity, Non-stationarity

Abstract

Climate change and human activities are altering the hydrological cycle and the stationarity of hydrological systems. Drought, a common and recurring consequence of these changes, affects the global climate, including our country. Traditional drought indices assume that atmospheric and environmental conditions remain constant, but recent research has revealed that this is not the case in a changing environment. As a result, these indices may not accurately reflect current or future drought conditions. This article seeks to examine the latest drought indices in non-stationary conditions and explore the challenges and opportunities for future research in this area. Initially, we will review existing indices designed for stationary weather patterns and then delve into those that have been modified for non-stationary conditions in regions like Iran and elsewhere. This paper will also address the tools and methodologies used to calculate non-stationarity in drought indices. Various studies have highlighted indices such as NSPI, NSRI, NSPEI, and NRDI as key non-stationary measures for quantifying meteorological and hydrological droughts. Non-stationary drought indices are capable of identifying more drought events compared to stationary ones. The studies have consistently employed the GAMLSS model to capture the non-stationary nature of these indices. By considering non-stationary factors in drought indices, past research indicates an enhancement in drought monitoring with improved accuracy in assessing both the intensity and frequency of drought events.

1. Introduction

Drought is a natural disaster that affects various aspects of human life and environment, especially in arid and semi-arid regions like Iran. Drought can be classified into four categories: meteorological, hydrological, agricultural and socio-economic drought, based on the parameters and impacts involved. Iran has a long history of droughts including those were occurred in: 1870–1872, 1917–1919, 1998–2002 and 2008–2010. It was shown that during 1894–2010, Iran (with an average annual precipitation of 254 mm) had experienced 23 drought events, ranging from 1 to 10 years. The 2008–2010 and 1998–2002 droughts (with the total precipitation deficits of 176.1 and 180.4 mm, respectively) were identified as the most severe and extensive drought events. These droughts resulted in famine, migration, social unrest, water scarcity, land degradation and desertification.

To assess the drought characteristics) intensity, duration and frequency (different drought indices have been developed. Some of the commonly used drought indices are Standardized Precipitation Index

* **Corresponding Author:** Sedigheh Anvari
Address: Assisstant Prof., Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.,
Email: s.anvari@kgut.ac.ir; anvari.t@gmail.com.
Tel: 98 913 255 9962

(SPI), Reconnaissance Drought Index (RDI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Palmer Drought Severity Index (PDSI). These indices are based on the stationarity assumption of the climate and hydrological systems. However, due to the effects of climate change and human activities, this assumption may not be valid anymore. Therefore, there is a need to revise or develop new drought indices that can account for the non-stationarity of the systems. Some of the recent studies have proposed or applied non-stationary drought indices, such as Non-stationary Standardized Precipitation Index (NSPI), Non-stationary Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (NSPEI), Non-stationary Reconnaissance Drought Index (NRDI) and Non-stationary Palmer Drought Severity Index (NPDSI). These indices use different methods to incorporate the non-stationarity of the mean and/or variance of the variables into the calculation of the drought severity.

Therefore, the main objective of this paper is to provide a comprehensive review of the latest proposed/developed drought indices in both stationary and non-stationary conditions and to express the challenges and opportunities of future research.

2. Materials and Methods

In this research, an overview of differnet drought indices which have been already developed for stationary climate conditions was firstly carried out. İn this regard a comperhensive review of univariate and multivariate of drought indices was done for meteorological, hydrological, agricultural. and socio-economic drought indices. Since the methodologis of these indices are mainly based on the stationary weather and environmental conditions, then we reviewed some of those indices proposed for the non-stationary conditions in Iran and other regions of the world. Review of the tools and methods for calculating non-stationary drought indicies is another goal this paper,

3. Results

Non-stationary drought indices are drought indices that account for the changes in the mean and/or variance of the climatic and hydrological variables over time. These changes may be caused by climate change and human activities, such as land use change, irrigation, urbanization and deforestation. A review of the various researches showed that indices like NSPI, NSRI, NSPEI and NRDI have been the most important non-stationary indices that have been employed to quantify the meteorological and hydrological droughts. Most of these indices are based on the non-stationary of the location parameter, that means for calculation of its distribution function, the location parameter is a multivariate function of external covariates, including time and other weather and climate indices. From the methodological point of view, all the researches used the generalized addetive model for location, scale and shape (GAMLSS) to model the non-stationary behavior of indices. Also, compared to stationary indices, the non-stationary drought indices are able to identify more drought events. Among all hydro-climate variables were used as the external covariates, teleconnections like ENSO, NAO and AO are the most influencing covariates for non-stationary analysis in GAMLSS modeling.,

4. Discussion and Conclusion

more accurate and realistic assessment of drought severity, duration, frequency and spatial extent than stationary drought indices, which assume that the statistical properties of the variables are constant over time. Non-stationary drought indices can also capture the trends and shifts in the drought patterns and provide early warning signals for future drought risks. However, non-stationary drought indices have some limitations and challenges, such as data availability and quality, selection of appropriate methods and models, uncertainty and sensitivity analysis, and validation and comparison with other indices. Therefore, it is important to compare and evaluate these drought indices in different regions and contexts.

5. Six important references

1) Bazrafshan, J., & Hejabi, S. (2018). A non-stationary reconnaissance drought index (NRDI) for drought monitoring in a changing climate. Water Resources Management, 32(8): 2611-2624.

2) Bazrafshan, J., Cheraghalizadeh, M., & Shahgholian, K. (2022). Development of a Non-stationary Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (NSPEI) for Drought Monitoring in a Changing Climate. Water Resources Management, 36(10): 3523-3543.

3) Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 83(8): 1149-1166.

4) Jehanzaib, M., Shah, S. A., Yoo, J., & Kim, T. W. (2020). Investigating the impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches. Journal of Hydrology, 588: 125052.

5) Li, J. Z., Wang, Y. X., Li, S. F., & Hu, R. (2015). A nonstationary standardized precipitation index incorporating climate indices as covariates. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(23): 12-082.

6) Wang, Y., Li, J., Feng, P., & Hu, R. (2015). A Time-Dependent Drought Index for Non-Stationary Precipitation Series. Water Resources Management: An International Journal, Published for the European Water Resources Association (EWRA), 29(15): 5631-5647.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

مروری بر برخی از شاخص‌های ایستا و ناایستا برای پایش خشک‌سالی در ایران و سایر کشورها

سحر دلاور[۱]، صدیقه انوری[۲]*، محمد نجف‌زاده[۳]، فرشاد فتحیان[۴]

تاریخ ارسال:۱۴۰۲/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۷/۲۶

مقاله پژوهشی

چکیده

تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی دو محرک اصلی اثرگذار بر چرخه هیدرولوژیکی و ایستایی/ناایستایی سیستم‌های هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند. در این میان، پدیده خشک‌سالی که زاییده تغییر مولفه‌های این چرخه است، به عنوان یک ویژگی ذاتی و تکرارپذیر آب و هوایی، در سراسر جهان و از جمله ایران، به وفور اتفاق می‌افتد. شاخص‌های موجود برای پایش خشک‌سالی، بر فرض ایستا بودن شرایط آب و هوایی و عوامل محیطی استوار بوده است. این در حالیست که نتایج تحقیقات دو دهه اخیر نشان می‌دهد که این شاخص‌ها در محیط ناایستای فعلی از جمله در زمینه تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، از اعتبار لازم برخوردار نیستند. هدف مقاله حاضر، علاوه بر بررسی شاخص‌های خشک‌سالی مورد استفاده در شرایط ایستا، ارائه مروری جامع از جدیدترین شاخص‌های خشک‌سالی در شرایط ناایستا و تبیین چالش‌ها و فرصت‌های تحقیقات آتی می‌باشد. در این راستا، ابتدا شاخص‌هایی که روش‌شناسی آنها عمدتا برای شرایط ایستای آب و هوایی پیشنهاد شده، بررسی می‌گردد. سپس، به مرور مهمترین شاخص‌های خشک‌سالی که در حالت ناایستای آب و هوایی در ایران و سایر مناطق دنیا توسعه داده شده‌اند، پرداخته می‌شود. مطالعه و مرور ابزارها و روش‌های مبتنی بر ناایستایی در تعیین شاخص‌های ناایستا از دیگر عواملی است که در مقاله حاضر بدان پرداخته خواهد شد. مرور تحقیقات مختلف نشان می دهد که شاخص‌هایی همانند NSPI، NSRI، NSPEI، NRDI از مهترین شاخص‌های ناایستایی هستند که برای کمّی کردن خشک‌سالی‌های هواشناسی/ هیدرولوژیکی کاربرد دارند. همچنین، در قیاس با شاخص‌های ایستا، شاخص‌های ناایستایی خشک‌سالی قادر به شناسایی رویدادهای خشک‌سالی بیشتری هستند. از منظر روش‌شناسی نیز همه تحقیقات، از مدل جمعی تعمیم‌یافته برای مکان، مقیاس و شکل (GAMLSS) برای مدلسازی رفتار ناایستای شاخص‌ها استفاده کرده‌اند. با مرور تحقیقات گذشته می‌توان پیشنهاد کرد که احتساب عوامل ناایستایی در محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی، باعث پایش دقیق‌تر خشک‌سالی از منظر شدت و فراوانی آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: GAMLSS، شاخص‌های خشک‌سالی، ایستایی، ناایستایی.

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه منابع آب، دانشکده عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.
.ایمیل:sahardelavaro15@gmail.com

[۲] استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.(نویسنده مسول)ایمیل:anvari.t@gmail.com

[۳] دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.
ایمیل:moha_najafzadeh@gmail.com

[۴] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران
ایمیل:s.anvari@kgut.ac.ir

مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان یک ویژگی ذاتی و تکرارپذیر اقلیمی، در نتیجه تغییر در مولفه‌های چرخه هیدرولوژیکی در سراسر جهان به وفور رخ داده به نحوی که پیامدهای مخربی بر اقتصاد، جامعه و محیط زیست به دنبال خواهد داشت. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که ایران طی چند قرن گذشته دچار خشک‌سالی‌های طولانی مدت و ویرانگر بوده است. در این میان، طی سال‌های ۱۸۹۴ تا ۲۰۱۰، ایران با میانگین بارندگی سالانه ۲۵۴ میلی‌متر، ۲۳ رویداد خشک‌سالی بین ۱ تا ۱۰ سال را در هر چهار دسته خشک‌سالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تجربه کرده است (Bazrafshan et al. 2022).

تغییرات آب و هوایی ناشی از عوامل طبیعی خارج از سیستم زمین و فعالیت‌های انسانی موجب تغییر رفتار رویدادهای حدی نظیر خشک‌سالی و سیل و نیز وقوع وضعیت ناایستایی در این پدیده‌ها می‌گردد. عدم ملاحظه این امر، اثرات زیانباری نظیر تخریب زمین، کاهش محصولات کشاورزی و قحطی در سراسر جهان به دنبال خواهد داشت (Sarhadi et al. 2016; IPCC 2007; Moghaddasi et al. 2022). برای مثال، تغییرات در بارش و تبخیر ممکن است شدت و فراوانی خشک-سالی‌های هیدرولوژیکی جهانی را در قرن ۲۱ تشدید کند. علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری/پوشش زمین[۱]، آبیاری کشاورزی، استخراج آب و تنظیم مخازن، چرخه هیدرولوژیکی را تغییر داده است و در نتیجه تغییرات در ویژگی‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی ایجاد می‌شود. چنین شرایطی مدیران و متولیان صنعت آب را وادار می‌سازد تا روش‌ها و ابزارهای موجود برای مدیریت منابع آب را متناسب با تغییر شرایط محیطی اصلاح یا حتی تغییر دهند. از جمله این ابزارها، برآورد و محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی هستند که در برنامه‌ریزی برای بهبود مدیریت منابع آب نقش کلیدی ایفا می‌کنند. به دلیل پیچیدگی و تنوع خشک‌سالی، معمولاً از شاخص خشک‌سالی برای توصیف و ارزیابی کمی ویژگی‌های خشک‌سالی استفاده می‌شوند (Misha Mishra and Singh 2009; and Singh 2010; Wilhite et al. 2014 ; Wilhite et al. 2014 al. 2017 Romero et).

به طور کلی، خشک‌سالی را می‌توان به عنوان "کمبود آب ناشی از کمبود بارندگی" یا "عدم تعادل هیدرولوژیکی ناشی از دوره بلندمدت از شرایط آب و هوایی غیرعادی خشک با بارندگی کم" تعریف کرد (Heim 2002). علاوه بر این، خشک‌سالی همچنین می‌تواند با کمبود در جریان رودخانه، رطوبت خاک، بهره‌وری کشاورزی و شرایط اجتماعی-اقتصادی مرتبط باشد (Huang et al. 2016; Zhang et al. 2017). بر این اساس، انواع خشک‌سالی رو می‌توان به چهار دسته خشک‌سالی هواشناسی[۲]، خشک‌سالی هیدرولوژیکی[۳]، خشک‌سالی کشاورزی و خشک‌سالی اقتصادی- اجتماعی تقسیم‌بندی کرد (Wilhite and Glantz, 1985). برای تعیین ویژگی‌های خشک‌سالی مانند شدت، مدت، اوج، گستره جغرافیایی و فراوانی یا دوره بازگشت از شاخص‌های خشک‌سالی استفاده می‌شود. شاخص‌های خشک‌سالی می‌توانند اطلاعات کمی در مورد شرایط فعلی یا تاریخی خشک-سالی و همچنین برآوردهای احتمالی وقوع یا خطر خشک‌سالی در آینده ارائه دهند. بسته به نوع خشک‌سالی، این شاخص‌ها از متغیرهای مختلف آب و هواشناسی، مانند بارش، دما، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، جریان رودخانه، ذخیره مخزن یا عملکرد محصول به دست می‌آیند (Misha and Singh, 2010).

شاخص‌هایی که از دیرباز برای تعریف خشک‌سالی-های نامبرده موجودند زمانی از دقت لازم برخوردارند که شرایط آب و هوایی پایدار یا به اصطلاح ایستا باشد. در شرایط ناپایدار اقلیمی، شاخص‌های خشک‌سالی مرسوم نیاز به بازبینی داشته به نحوی که روش‌شناسی آنها بتواند جواب‌گوی شرایط ناایستای آب و هوایی باشد Sarhadi (et al. 2016). به طور کلی، عوامل ناایستایی در سری-های زمانی خشک‌سالی عواملی هستند که باعث می‌شوند ویژگی‌های آماری متغیرهای خشک‌سالی مانند میانگین، واریانس، چولگی و غیره در طول زمان یا مکان تغییر

---

[۱] Land Use/ Land Ccover (LULC)
[۲] Meteorological Drought
[۳] Hydrological Drought

کنند. این عوامل می‌توانند طبیعی یا انسانی باشند و به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر خشک‌سالی تأثیر بگذارند. شرایط ناایستا به ما این امکان را می‌دهد تا پارامترهای توابع توزیع احتمال متغیرهای آب و هواشناسی را به صورت توابع خطی/غیرخطی متغیرهای کمکی مدل کنیم. در این حالت، می‌توان متغیرهای زمان یا سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی (الگوهای دور پیوند)[1] را به عنوان متغیرهای کمکی انتخاب کرد (Wang et al. 2015; Li et al. 2015; Fathian et al. 2021)

در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت پدیده خشک‌سالی و نتایج مطالعات پیشین، اقدام به گردآوری مطالعات انجام گرفته در خصوص انواع شاخص‌های ایستا و ناایستای خشک‌سالی شده است. ارتباط ناایستایی خشک‌سالی تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی و نیز روش‌های مدل‌سازی و کمّی کردن این ناایستایی از اهداف دیگر مقاله حاضر می‌باشد. با بررسی تحقیقات انجام شده در ایران و سایر کشورها، پژوهشگرانی که قصد انجام مطالعات جدید در این حوزه را دارند می‌توانند از این مقاله به عنوان مروری جامع پیرامون موضوع اشاره شده بهره‌مند گردند. ضمناً مدیران و تصمیم‌گیران نیز می‌توانند از وجوه مشترک در تحقیقات گذشته آگاه شده و درک بهتری از روند مطالعات کسب نمایند. این امر می‌تواند بستر مناسبی برای استفاده از یافته‌های تحقیقات مختلف در فرآیند تصمیم‌گیری ایجاد نماید.

مواد و روش‌ها

- مروری بر انواع شاخص‌های خشک‌سالی مورد استفاده در حالت ایستا

Wilhite و Glants (۱۹۸۵) خشک‌سالی را به چهار دسته خشک‌سالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم نموده‌اند. خشک‌سالی هواشناسی هنگامی رخ می‌دهد که مقدار بارندگی در یک بازه زمانی معین کمتر از مقدار میانگین درازمدت آن باشد. خشک‌سالی هیدرولوژیکی به معنی کاهش مقدار آورد رودخانه‌ها و افت سطح آب دریاچه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی نسبت به میانگین دراز مدت آن‌ها می‌باشد. وقوع خشکسالی کشاورزی هنگامی است که به دلیل کمبود جدی مقدار رطوبت خاک در دوره رشد گیاه، تولید محصولات کشاورزی کاهش یابد. خشک‌سالی اقتصادی-اجتماعی نیز بر مبنای میزان عرضه و تقاضای آب تعریف می‌شود، به این معنی که هرگاه که میزان تقاضای معمول آب برای فعالیت‌های اقتصادی بیشتر از عرضه آن گردد، این نوع خشک‌سالی اتفاق می‌افتد(Dracup et al. 1980; Glants and Wilhite, 1985; Jain et al. 2010; Van Loon 2015;). شاخص‌های خشک‌سالی برای تعیین ویژگی‌های خشک‌سالی مانند شدت، مدت، پیک، گستره جغرافیایی و فراوانی یا دوره بازگشت مفید هستند (Hao et al. 2017; Rashid and Anvari et al. 2023; Beecham, 2019; Xu et al. 2015).

در دهه‌های اخیر شاخص‌های تک متغیره زیادی برای توصیف انواع مختلف خشک‌سالی پیشنهاد و برای مناطق مختلف جهان به کار گرفته شده‌اند. با این وجود، نتایج تحقیقات مختلف در زمینه تجزیه و تحلیل خشک‌سالی نشان می‌دهد که به دلیل ارتباط پدیده خشک‌سالی با متغیرهای متعددی (مانند بارش، رواناب و رطوبت خاک، ...) شاخص‌های تک متغیره، تکافوی لازم برای توصیف خشک‌سالی را نمی‌دهند. از اینرو علاوه بر شاخص‌های نامبرده برای توصیف انواع مختلف خشک‌سالی، به منظور آنالیز کامل و دقیق‌تر رویدادهای خشک‌سالی، استفاده از شاخص‌های چند متغیره یا ترکیبی، که ترکیبی از شرایط بارندگی، رواناب و رطوبت خاک می‌باشند، توصیه شده است. لذا در ادامه علاوه بر شاخص‌های چهار گانه مطرح در خشک‌سالی، به معرفی برخی از شاخص‌های ترکیبی در اینباره پرداخته می‌شود (Keyantash et al. 2004; Hao and AghaKouchak, 2013; Dracup et al. 1980).

- **شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی**: عبارتند از شاخص بارندگی استاندارد شده[2] (SPI, McKee et al. 1993)، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI:

[1] Teleconnections
[2] Standardized Precipitation Index

(Palmer, 1965)[۱] ، شاخص بارش- تبخیر و تعرّق استاندارد شده (SPEI: Vicente-Serrano et al. 2010)[۲]، شاخص درصد نرمال[۳] (PN: Hayes, 2000)، شاخص دهک[۴] (DI: Maher and Gibbs, 1967)، شاخص خشک‌سالی موثر (EDI: Byun and wilhite, 1999)[۵]، شاخص درصد نرمال بارش (PNPI: Willeke et al. 1994)[۶]، شاخص استاندارد بارندگی سالانه (SIAP: JAMAB, 1991)[۷]، شاخص نابهنجاری یا بی نظمی بارش (RAI: Van-Rooy, 1965)[۸]، شاخص خشک‌سالی بالم و مولی (BMDI: Bhalem and Mooley, 1980)[9]، شاخص موثر بارش (EPI: Byun and Wilhite, 1999)[۱۰]، شاخص خشک‌سالی احیایی (RDI: Tsakiris, 2004; Tsakiris and Vangelis, 2005)[۱۱]، شاخص ملی بارندگی (NRI: Gommes and Petrassi, 1994)[۱۲]،

- **شاخص‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی:** عبارتند از شاخص تامین آب سطحی (SWSI: Shafer and Dezman, 1982)[۱۳]، شاخص خشک-سالی جریان رودخانه (SDI: Zvi-Ben, 1987)[۱۴]، شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی پالمر (PHDI: Sharma and Panu, 2010)[۱۵]، شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI: Welford et al. 1993)[۱۶] ، شاخص استاندارد شده رواناب (SRI: Shukla and Wood, 2008)[۱۷]، شاخص سطح آب استاندارد شده، شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI: Mendicino.et al 2008)[۱۸]، شاخص استانداردشده سطح آب (SWI: Bhuiyan, 2004)[۱۹]، (SMI: Hunt et al. 2015)[۲۰]، شاخص هیدرولوژیکی استاندارد (SHI: Sharma and Panu, 2010)[۲۱].
- **شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی:** عبارتند از شاخص‌های رطوبت محصول (CMI: Palmer, 1968)[۲۲]، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI: Palmer, 1965)[۲۳]، شاخص خشکی ویژه گیاه (CSDI:Meye et al. 1993)[۲۴]، شاخص خشک‌سالی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک (SMADI: 25 Sanchez et al. 2016)، شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI: Narasimhan and Srinivasan, 2005)، شاخص شرایط خشک‌سالی مقیاس شده (SDCI: Rhee et al. 2010)[۲۷]، شاخص رطوبت خاک استاندارد شده (SSMI: Xu et al. 2018)[۲۸]، شاخص اختلاف نرمال شده آب / مبتنی بر تصاویر ماهواره (NDWI: Gao, 1996)[29]، شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی / مبتنی بر تصاویر ماهواره (NDVI: Tarpley et al.1984)[۳۰]، شاخص رطوبت خاک استاندارد شده تجربی (ESSMI: Carrão et al. 2016)[۳۱]، شاخص خشک‌سالی کشاورزی خاک (SMADI: Sánchez, 2016)[۳۲]، شاخص خشکی ویژه محصول (CSDI: Meyer et al. 1993a)[۳۳]، شاخص کمبود تبخیر و تعرق (ETDI: Narasimhan and Srinivasan, 2005)[۳۴]، شاخص نسبی رطوبت خاک

---

[۱] Palmer Drought Severity Index
[۲] Standardized precipitation-evapotranspiration index
[۳] Percent of Normal
[٤] Deciles Index
[٥] Effective Drought Index
[٦] Percent of Normal Precipitation Index
[۷] Standard Index Of Annual Precipitation
[۸] Rain fall anomaly index
[9] Bahlme and Mooley drought index
[۱۰] Effective Precipitation Index
[۱۱] Reconnaissance Drought Index
[۱۲] National Rainfall Index
[۱۳] Surface Water Supply Index (SWSI)
[۱٤] Streamfow drought index
[۱٥] Palmer Hydrological Drought Index
[۱٦] Soil Moisture Drought Index
[۱۷] Standardized Runoff Index
[۱۸] Groundwater Resource Index
[۱۹] Standardized Water-Level Index
[۲۰] Soil Moisture Index
[۲۱] Standardized Hydrological Index
[۲۲] Crop Moisture Index
[۲۳] Palmer Drought Severity Index
[۲٤] Crop Specific Drought Index
[25] Soil Moisture Agricultural Drought Index
[26] Soil Moisture Deficit Index
[۲۷] Scaled Drought Condition Index
[۲۸] Standardized Soil Moisture Index
[29] Normalized Difference Water Index
[۳۰] Normalized Difference Vegetation Index
[۳۱] Empirical Standardized Soil Moisture Index
[۳۲] Soil Moisture Agricultural Drought Index
[۳۳] crop-specific drought index
[۳٤] Evapotranspiration Deficit Index

(RSMI: Sivakumar et al. 2010)[۱]، شاخص کمبود آب آبیاری (IWDI: Xing et al. 2020)[۲]

- **شاخص‌های خشک‌سالی اقتصادی- اجتماعی:** عبارتند از شاخص خشک‌سالی اقتصادی – اجتماعی (SeDI:Kimwatu et al. 2021)[۳]، شاخص چند متغیره اعتمادپذیری و بازگشت‌پذیری استانداردشده (MSRRI: Mehran et al. 2015)[4]
- **شاخص‌های ترکیبی خشک‌سالی:** برخی از این شاخص‌ها عبارتند از شاخص منطقه‌ای خشک‌سالی، شاخص ترکیبی خشک‌سالی هیدرولوژیکی و هواشناسی (RDAI :Fleig et al. 2011)[۵] ، شاخص تجمیعی خشک‌سالی، ترکیب شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی (: ADI Keyantash and Dracup, 2004)[۶]، شاخص ترکیبی خشک‌سالی، ترکیب شاخص‌های هواشناسی(SPI)، هیدرولوژیکی(SWSI) و کشاورزی(PDSI) (CDI: محمدعلی علیایی و همکاران، ۱۳۹۸)[۷]، شاخص چین-زد (CZI: Ju et al. 1997)، شاخص چند متغیره استاندارد خشک‌سالی، ترکیب شاخص‌های هواشناسی(SPI)، شاخص استاندارد رطوبت خاک (SSI) (MSDI: Hao and AghaKouchak, 2013)[۸]، شاخص ترکیبی خطی خشک‌سالی (LDI: Mo and Lettenmaier, 2014)[۹]، شاخص واکنش پوشش گیاهی به خشک‌سالی/ شاخص پاسخ به خشکی گیاه، ترکیبی از SPI، PDSI و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به دست آمده از تصاویر ماهواره [10] (VegDRI: Brown et al. 2008)

مرور برخی از شاخص‌های خشک‌سالی مورد استفاده در شرایط ناایستا

بسیاری از محققان بر این باورند که تغییرات آب‌وهوایی، در بیشتر موارد احتمالی، میانگین (پارامتر موقعیت مکانی) متغیرهای آب‌وهوا را در مقیاس منطقه‌ای یا جهانی تغییر می‌دهد؛ بنابراین استفاده از مدل‌های ناایستا منطقی‌تر به نظر می‌رسد. در این راستا برخی از شاخص‌های ناایستای خشک‌سالی که پارامترهای تابع توزیع، با زمان متغیر می-باشند پیشنهاد شده‌اند، که عبارتند از شاخص استاندارد بارندگی ناایستا (SnsPI : Russo et al. 2013)[۱۱]، شاخص بارش استاندارد شده ناایستا (NSPI:Li et al. 2015)[۱۲]، شاخص شناسایی خشک‌سالی ناایستا NRDI: (Bazrafshan and Hejabi, 2018)[۱۳] و شاخص رواناب استاندارد ناایستا(NSSI: Wang et al. 2020)[۱۴].

- **شاخص SPI در حالت ایستا و ناایستا**

در شاخص معمول SPI ابتدا، سری زمانی بارش بلند مدت بصورت ماهانه در یک مقیاس زمانی معین با استفاده از روش میانگین متحرک محاسبه می‌شود. این سری بارش در شرایط ایستای آب و هوایی، از توزیع گامای دو پارامتری تبعیت می‌کند. در حالت ناایستای SPI (NSPI) که در آن داده‌های بارندگی ناایستا می‌باشند، نه تنها پارامتر توزیع احتمال اصلاح شده، بلکه دوره بازگشت تحت فرآیند ناایستا نیز اصلاح می‌گردد (Milly et al. 2008; Li et al. 2015; Rashid and Beecham 2019; Wang et al. 2015; Bazrafshan et al. 2022). در محاسبه NSPI که توسط Li و همکاران (۲۰۱۵) پیشنهاد شده است فرض می‌شود که پارامتر میانگین یا مقیاس توزیع گامای بارش به صورت خطی با زمان تغییر می‌کند، لذا به کارگیری تابع چند متغیره از متغیر زمان، متغیرهای هواشناسی/ هیدرولوژیکی یا سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی، می‌توانند بعنوان متغیرهای کمکی، رفتار ناایستایی خشک‌سالی را به خوبی مدلسازی نمایند (Russo et al. 2013; Chanda and Maity 2015; Wang et al. 2015).

به عنوان مثال، Russo و همکاران (۲۰۱۳) شاخص NSPI را برای بررسی ناایستایی بارندگی و تغییرات SPI استفاده کردند. بدین صورت که توزیع گامای غیرایستا که

---

[۱] Relative Soil Moisture Index
[۲] Irrigation Water Deficit Index
[۳] Socio-economic Drought Index
[4] Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index
[۵] Regional Drought Area Index
[۶] Aggregate Drought Index
[۷] Combined Drought Indicator
[۸] Multivariate Standardized Drought Index
[۹] Linearly Combined Drought Index
[10] Vegetation Drought Response Index
[۱۱] Standardized Nonstationary Precipitation Index
[۱۲] Non-stationary Standardized Precipitation Index
[۱۳] Reconnaissance Drought Index Nonstationary
[۱۴] Non-stationary Standardized Streamflow Index

در آن پارامتر مقیاس بطور خطی با زمان تغییر می‌کند را توسعه داده و سپس یک شاخص استاندارد شده بارندگی ناایستا (SnsPI)[۱] را برای توصیف تغییرات بارش در اروپا محاسبه کرد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که SnsPI در مدلسازی سری‌های زمانی بارش نسبت به SPI مرسوم، از دقت بیشتری برخوردار بوده و پایدارتر است(Russo et al. 2013). در تحقیقی دیگر توسط Li و همکاران (۲۰۱۵) شاخص ناایستای NSPI که در آن علاوه بر زمان، سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی نظیر NAO2، SOI[۳]، AMO[۴]، AO[۵]، NP[۶]، PDO[۷] را بعنوان متغیرهای کمکی برای توصیف خطی ناایستایی داده‌های بارش استفاده می‌شد، مورد بررسی قرار دادند. داده‌های بارش ماهانه ثبت شده در ۲۱ باران‌سنج در حوضه رودخانه Luanhe (چین) برای دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۱ در روش‌شناسی این تحقیق استفاده شدند. در تحقیقی دیگر با فرض ناایستایی در پارامترهای مکان، Wang و همکاران (۲۰۱۵) شاخص SPI وابسته به زمان (SPIt)[۸] را برای مدلسازی رفتار ناایستای داده‌های فصلی بارش در تابستان (سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۱) حوضه رودخانه Luanhe و در نهایت ارتباط آنها با خشک‌سالی را با استفاده از بسته GAMLSS توسعه دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای پایش خشک‌سالی در شرایط ناایستا باشد (Wang et al. 2015). با فرض ناایستایی در پارامترهای مکان و شکل، Mamunur Rashid و Beecham (۲۰۱۸) شاخص ناایستای NSPI که در آن علاوه بر زمان، سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی نظیرDMI[۹]، SOI، SAM[۱۰]، Niño3.4، PDO را بعنوان متغیرهای کمکی برای توصیف ناایستایی داده‌های بارش استفاده می‌شد، مطالعه نمودند. در این تحقیق داده‌های ۴۶ ایستگاه باران‌سنجی در جنوب استرالیا مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاکی از برتری شاخص NSPI نسبت به SPI مرسوم بود (Mamunur Rashid and Beecham, 2018).

- **شاخص SPEI در حالت ایستا و ناایستا**

برخلاف SPI، SPEI دربرگیرنده متغیرهای بارش و دما بوده و تأثیر اصلی افزایش دما را بر تقاضای آب نشان می‌دهد. مانند SPI، SPEI را می‌توان در محدوده زمانی از ۱ تا ۴۸ ماه محاسبه کرد. این شاخص از تفاضل بارندگی (P) و مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل ($D_i = P_i - ETP_i$) بدست می‌آید. که در آن ETP[۱۱] تبخیر - تعرق پتانسیل، D اختلاف آنها و i شماره ماه موردنظر است. ETP را می‌توان با روش ساده Thornthwaite و به کارگیری متغیرهایی چون سرعت باد، رطوبت سطح و تابش خورشیدی تخمین زد (Bazrafshan et al. 2022; Vicente-Serrano et al. 2010).

درحالی‌که SPEI در حالت ایستا، تمام پارامترهای ورودی به تابع چگالی احتمال لوگ – لجستیک سه پارامتری، را با زمان ثابت در نظر می‌گیرد، NSPEI یک مدل ناایستای بهینه را به سری زمانی این متغرهای برازش داده و فرض می‌کند که یک یا چند پارامتر ورودی به سیستم به‌عنوان تابعی از متغیرهای کمکی همانند زمان و سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی (همچونENSO[۱۲]، NAO[۱۳]، AO[۱۴]، NCP[15]) هستند (Bazrafshan et al. 2022).

- **شاخص SRI در حالت ایستا و ناایستا**

یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در سراسر جهان برای ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی، شاخص استاندارد رواناب(SRI)[۱۶] است که توسط Shukla and Wood (2008) بر اساس تئوری شاخص بارش استاندارد (SPI)[۱۷] پیشنهاد شده است. به دلیل ساده‌بودن محاسبه، داده‌های محدود موردنیاز و

---

۱ Standardized Nonstationary Precipitation Index (SnsPI)
۲ North Atlantic Oscillation
۳ Southern Oscillation Index
۴ Oscillation Atlantic Multidecadal
۵ Arctic Oscillation
۶ North Pacific Index
۷ Pacific Decadal Oscillation
۸ Time-Dependent Standardized Precipitation Index
۹ Dipole Model Index
۱۰ Southern Annular Mode
۱۱ Potential Evapotranspiration
۱۲ El Niño-Southern Oscillation
۱۳ North Atlantic Oscillation
۱۴ Arctic Oscillation Index
15 North Caspian Sea Pattern
۱۶ standardized runoff index
Oscillation Atlantic Multidecadal
۱۷ Standard Precipitation Index

مقیاس‌های زمانی مختلف برای ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی، پذیرفته‌شده‌ترین شاخص محسوب می‌شود (Telesca et al. 2012; Jiang et al. 2021). علل خشک‌سالی هیدرولوژیکی پیچیده هستند و عمدتاً تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی و اختلالات ناشی از فعالیت های انسانی قرار دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که به دلیل گرمایش جهانی و اختلالات ناشی از فعالیت‌های انسانی فرض ایستایی SRI اغلب نقض می‌شود (Xiong and Guo, 2004; Villarini et al. 2009; Talaee et al. 2014; Van Loon et al. 2016; Huang et al. 2016; Liu et al. 2019; Wu et al. 2020;).

شاخص ناایستای SRI (NSRI) با استفاده از چارچوب GAMLSS برای ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی و توجیه روند معنادار در مقادیر رواناب (جریان رودخانه) استفاده شده است. تعریف NSRI مشابه SRI است، با این تفاوت که در آن برای توصیف ویژگی‌های ناایستایی داده‌های رواناب، از توزیع گامای غیرایستا که پارامترهای آن (مکان/ مقیاس) ترکیب خطی/غیر خطی از متغیرهای کمکی (متغیرهای اقلیمی، هیدرولوژیکی یا فعالیت‌های انسانی) است، استفاده می‌شود (Russo et al. 2013; Li et al. 2015; Wang et al. 2015a; Bazrafshan and Hejabi, 2018; Wang et al. 2019b; Wang et al. 2022)

برخی از مطالعات اخیر، تغییرپذیری خشک‌سالی هیدرولوژیکی را در ارتباط تنگاتنگ با سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی همانند نوسان جنوبی النینو (ENSO)، نوسان چند دهه اقیانوس اطلس(AMO) ، نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO) و نوسان چند دهه اقیانوس اطلس (AMO)[1] نشان داده است(Talaee et al. 2014; Huang et al. 2016; Wu et al. 2020; Abdelkader and Yerdelen 2022). علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی مانند تغییرات کاربری/پوشش زمین، آبیاری کشاورزی، استخراج آب و تنظیم مخازن، چرخه هیدرولوژیکی را تغییر داده و منجر به تغییر در ویژگی‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی می‌شود (Sheffield et al. 2012; Van Loon et al. 2016; Jehanzaib et al. 2020)

به عنوان مثال، Wang و همکاران (2022) یک شاخص جدید خشک‌سالی هیدرولوژیکی ناایستا که مبتنی بر شامل شاخص‌های اقلیمی و شاخص اصلاح شده مخزن (MRI)[2] به عنوان متغیرهای کمکی است، توسعه دادند. مدلسازی این تحقیق با استفاده از پکیج GAMLSS و برای حوضه رودخانه Hanjiang (چین) و داده‌های ماهانه رواناب (۲۰۲۰-۱۹۵۶) انجام شد و برای ارزیابی نتایج از شاخص SRI ایستای مرسوم استفاده گردید. شاخص‌های اقلیمی، همانند SOI، PDO، AO ، NAO، AMO[3] و NPO[4] استفاده گردید. همچنین از شاخص‌های مخزن (RI, MRI) به عنوان متغیرهای کمکی برای توصیفه رواناب که تابعی از شرایط مخزن است استفاده گردید. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه NSRI در شناسایی وقایع حدی خشک‌سالی از SRIمعمولی، عملکرد بهتری داشته است (Wang et al. 2022).

- **شاخص RDI در حالت ایستا و ناایستا**

شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI) توسط Tsakiris and Vangelis(2005) معرفی شد. این شاخص براساس نسبت بارش به تبخیر و تعرق تجمعی برای یک دوره زمانی معین در یک سال آبی محاسبه می‌شود، که می تواند بر محدودیت‌های SPI غلبه کند. فرایند محاسبه با جمع‌آوری داده‌های ورودی از جمله بارش ماهانه P و دمای هوا ماهانه T آغاز می‌شود. از داده‌های دمای ماهانه برای محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه PE استفاده می‌شود. RDI بر اساس این فرض محاسبه می‌شود که پارامترهای مربوط ایستا هستند. در شرایط اقلیمی متغیر، شاخص RDI برای پیش‌بینی ویژگی‌های خشک‌سالی شدید کافی نیست. بنابراین Bazrafshan و Hejabi یک شاخص ناایستا NRDI توسعه دادند(Bazrafshan and Hejabi, 2018) که از توزیع لوگ نرمال با پارامترها مکان و مقیاس پیروی کنند. برای NRDI یک تابع توزیع لوگ نرمال ناایستا که در آن پارامتر مکان آن μ (t) به صورت

[1] Oscillation North Atlantic Multidecadal
[2] reservoir index Modified
[3] North Pacific Oscillation

خطی با زمان تغییر می‌کند و پارامتر مقیاس آن σ در طول زمان تغییر نمی‌کند از بسته GAMLSS برای برآورد پارامتر توزیع لوگ نرمال ناایستا یعنی پارامتر مکان که به صورت خطی به زمان به عنوان متغیر کمکی مربوط است، استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

• شناسایی عامل ناایستایی

یکی از چالش‌های مهم در توسعه و به کارگیری شاخص‌های خشک‌سالی در شرایط ناایستا، شناسایی و کمّی کردن منابع و محرک‌های عدم ایستایی در تحلیل خشک‌سالی است. از آنجایی که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی می‌توانند چرخه هیدرولوژیکی را به شیوه‌های مختلف تحت تاثیر قرار دهند، جداسازی و نسبت دادن اثرات فردی یا ترکیبی آنها بر وقوع یا شدت خشک‌سالی دشوار است. بنابراین، استفاده از منابع متعدد داده‌ها و اطلاعات، مانند شاخص‌های اقلیمی، داده‌های کاربری اراضی، داده‌های مخزن، داده‌های ماهواره‌ای و غیره برای بررسی متغیرهای کمکی بالقوه یا شاخص‌های غیرایستایی در تحلیل خشک‌سالی ضروری است (Li et al. 2013; Li et al. 2015; Wang et al. 2022).

از جمله عواملی که باعث ایجاد ناایستایی در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی می‌شود، تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم می‌تواند الگوهای جهانی و منطقه‌ای بارش و دما را تغییر دهد که محرک‌های اصلی وقوع و شدت خشک‌سالی هستند. به عنوان مثال، تغییر اقلیم می‌تواند فراوانی و شدت رویدادهای شدید مانند امواج گرما، خشک‌سالی، سیل و غیره را افزایش یا دوره‌های فصلی بارش و دما را تغییر دهد. تغییر اقلیم همچنین می‌تواند بر تبخیر و تعرق بالقوه (PET) تأثیر گذارد، که معیاری برای سنجش تقاضای جوی برای آب است. PET به عوامل مختلفی مانند تابش خورشید، رطوبت، سرعت باد و غیره بستگی دارد که می‌تواند تحت تأثیر تغییر اقلیم نیز قرار گیرد. بنابراین، تغییر اقلیم می‌تواند با تغییر میانگین و تغییرپذیری بارش و PET، ناایستایی در سری‌های زمانی خشک‌سالی ایجاد کند. فعالیت‌های انسانی نیز به عنوان یک عامل دیگر می‌تواند چرخه هیدرولوژیکی را به طرق مختلفی از جمله تغییر کاربری و پوشش اراضی، شیوه‌های آبیاری، مصرف و تنظیم آب و غیره تحت تاثیر قرار دهد. این فعالیت‌ها می‌توانند بیلان و در دسترس بودن آب را در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف تغییر دهند و در نتیجه، بر متغیرهای خشک‌سالی تأثیر گذارند. به عنوان مثال، تغییر کاربری و پوشش اراضی می‌تواند ویژگی‌های سطحی مانند آلبیدو، ناهمواری، پوشش گیاهی و غیره را تغییر دهد که این مساله می‌تواند بر بیلان انرژی و فرآیندهای تبخیر و تعرق موثر است. روش‌های آبیاری می‌تواند رطوبت خاک را افزایش داده و تنش خشکی را برای محصولات کاهش دهد، اما همچنین باعث افزایش تقاضای آب و کاهش آن می‌شود. مصرف و تنظیم آب می‌تواند رژیم جریان طبیعی رودخانه‌ها و نهرها را تغییر دهد و بر ذخیره و خروج آب از مخازن و سدها تأثیر گذارد. بنابراین، فعالیت‌های انسانی می‌توانند با تغییر میانگین و تغییرپذیری بارش و PET، و همچنین معرفی روندها یا چرخه‌های مصنوعی در متغیرهای خشک‌سالی، سری‌های زمانی خشک‌سالی غیرایستا تولید کنند (Li et al. 2013; Li et al. 2015; Wang et al. 2022).

• روش تحلیل خشک‌سالی در حالت ناایستا

در این بخش، برخی از شاخص‌های خشک‌سالی را در حالت ناایستا که بهبود یا توسعه یافته‌اند، بررسی می‌کنیم. روش‌های تحلیل خشک‌سالی با توجه به رویکردشان به دو گروه روش‌های پارامتری و ناپارامتری دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های پارامتریک بر اساس فرضیه‌هایی درباره توزیع احتمال داده‌ها عمل می‌کنند و نیازمند فرضیه‌گذاری در مورد توزیع احتمال داده‌ها هستند. اما روش‌های ناپارامتریک، بدون نیاز به فرضیه‌گذاری خاص درباره توزیع احتمال داده‌ها، بر اساس روش‌های ناپارامتریک اقدام به تحلیل خشک‌سالی می‌کنند.

روش‌های پارامتری: از جمله روش‌های مرسوم برای تحلیل خشک‌سالی در حالت ایستا و ناایستا است. این روش‌ها فرض می‌کنند که متغیرهای خشک‌سالی از توابع توزیع احتمال خاصی با پارامترهای متغیر با زمان پیروی می‌کنند. پارامترها با استفاده از مدل‌های

رگرسیونی یا مدل‌های جمعی تعمیم‌یافته[1] با زمان یا سایر متغیرهای کمکی به عنوان متغیرهای توصیفی[2] برآورد می‌شوند. سپس، ناهنجاری‌های استاندارد شده[3] متغیرهای خشک‌سالی با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده برای هر مرحله زمانی محاسبه می‌شوند. برای این منظور، از مدل جمعی تعمیم‌یافته برای مکان، مقیاس و شکل (GAMLSS)4 استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، محققان شروع به تحلیل ناایستا رویدادهای حدی آب و هواشناسی با استفاده از مدل GAMLSS که ابزاری مؤثر برای مدل‌سازی سری‌های زمانی تحت شرایط ناایستا هستند، کرده‌اند. GAMLSSی‌کی از تکنیک‌های شبیه‌سازی سری‌های زمانی غیرایستا است و می‌تواند انعطاف‌پذیری بالایی برای حل مدل‌سازی ناایستا فراهم کند (Villarini et al. (2009); Zheng et al. (2018). در ادامه به برخی مطالعاتی که به توسعه برخی شاخص‌های خشک‌سالی در شرایط ناایستا با استفاده از این ابزار پرداخته‌اند، اشاره می‌شود.

شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده در حالت ناایستا (NSPEI) با استفاده از توزیع لوگ-لجستیک و برآورد پارامترهای مکان و مقیاس آن توزیع با استفاده از مدل رگرسیون خطی با زمان به عنوان یک متغیر توصیفی و تبدیل داده‌ها به توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس واحد برای هر مرحله زمانی محاسبه می‌شوند (Bazrafshan et al. 2022).

NRDI شاخص شناسایی خشک‌سالی در حالت ناایستا با استفاده از توزیع لوگ-نرمال و برآورد پارامتر مکان آن توزیع با استفاده از مدل رگرسیون خطی با زمان به عنوان یک متغیر توصیفی تبدیل ناهنجاری‌های بارندگی استاندارد شده به یک توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس واحد برای هر مرحله زمانی محاسبه می‌شوند. (Bazrafshan and Hejabi 2018)

شاخص رواناب استاندارد ناایستا (NSRI) توسط Wang et al. (2022) توسعه یافت که داده‌های رواناب به توزیع گاما با استفاده از بسته GAMLSS و شاخص‌های اقلیمی و شاخص اصلاح‌شده مخزن به عنوان متغیرهای توصیفی، برازش یافته است. شاخص بارش استاندارد شده ناایستا (NSPI) نیز توسط Li et al. (2015) با ترکیب ناایستایی در توزیع گامای بارش شاخص SPI با استفاده از روش GAMLSS با زمان به عنوان یک متغیر توصیفی توسعه یافته است.

روش‌های ناپارامتری: استفاده از روش‌های تحلیل خشک‌سالی بر اساس رویکرد ناپارامتری، که مبتنی بر توزیع‌های ناپارامتری هستند، به عنوان یک الگوی قوی و پرکاربرد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این روش ها بر اساس توابع توزیع تجمعی تجربی (ECDFs[5])، برآوردگرهای چگالی هسته (KDEs[6])، یا کاپولا[7] هستند. ECDFها توابع ساده و شهودی هستند که احتمالی را به هر مقدار مشاهده شده بر اساس رتبه آن در مجموعه داده، اختصاص می‌دهند. KDEها تکنیک‌های هموارسازی هستند که تابع چگالی احتمال داده‌ها را با استفاده از یک تابع هسته و یک پارامتر پهنای باند تخمین می‌زنند. کاپولاها توابعی هستند که ساختار وابستگی بین چندین متغیر را بدون مشخص کردن توزیع حاشیه‌ای آنها توصیف می‌کنند. یکی از اولین مطالعاتی که روشی ناپارامتری را برای استخراج شاخص‌های خشک‌سالی استاندارد شده معرفی کرد، توسط Farahmand and AghaKouchak (2015) بود که جعبه ابزار استاندارد تحلیل خشک‌سالی (SDAT[8]) را توسعه دادند. SDAT یک چارچوب تعمیم یافته است که می‌تواند برای متغیرهای آب و هوایی مختلف، مانند بارش، رطوبت خاک، جریان رودخانه و رطوبت نسبی، بدون نیاز به فرض توزیع پارامتری معینی به کا برده شود. SDAT از ECDF ها برای تبدیل داده‌های اصلی به متغیرهای نرمال استاندارد استفاده می‌کند، سپس برای محاسبه شاخص‌های استاندارد تک متغیره یا چند متغیره استفاده می‌شود. SDAT دارای چندین مزیت از جمله

[1] Generalized Additive Models
[2] Explanatory variables
[3] Standardized anomalies
[4] Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape
[5] Empirical cumulative distribution functions
[6] Kernel density estimator
[7] Copula
[8] Standardized drought analysis toolbox

انعطاف‌پذیری، سازگاری، قوی و آسان بودن برای پیاده‌سازی نسبت به روش‌های پارامتری است.

در مطالعه دیگری، Hao and AghaKouchak (2014) چارچوب جدیدی برای پایش خشک‌سالی مبتنی بر چند متغیر نظیر بارش و رطوبت خاک پیشنهاد دادند. این چارچوب شاخص خشک‌سالی استاندارد شده چند متغیره (MSDI[1]) نامیده می‌شود و از رویکرد ناپارامتری برای تخمین احتمال مشترک وقوع خشک‌سالی بر اساس حالات متغیرها استفاده می‌کند. این پژوهش MSDI را در برابر داده‌های پایش خشک‌سالی ایالات متحده (USDM) و سایر شاخص‌های خشک‌سالی رایج در سراسر قاره ایالات متحده ارزیابی می‌کند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که MSDI دارای مزایایی مانند احتمال بالاتر تشخیص خشک‌سالی، سازگاری با USDM، و اطلاعات و بینش اضافی در مورد نظارت بر خشک‌سالی نسبت به شاخص‌های تک متغیری است.

مطالعه دیگری که از روش ناپارامتری برای استخراج شاخص‌های خشک‌سالی استاندارد شده استفاده کرد، توسط Tijdeman et al. (2020) انجام شد که روش‌های مختلف پارامتری و ناپارامتری را برای محاسبه شاخص جریان استاندارد شده SSI مقایسه کرد. SSI یک شاخص ناهنجاری است که انحراف جریان جریان را از میانگین بلندمدت آن در واحدهای انحراف استاندارد اندازه گیری می کند. Tijdeman et al. (2020) هفت توزیع احتمال مختلف و دو روش برازش و همچنین روش‌های ناپارامتری مختلف بر اساس ECDF و KDE را برای ۳۶۹ رودخانه در سراسر اروپا ارزیابی کرد. آنها دریافتند که سری‌های زمانی SSI و ویژگی‌های خشک‌سالی نسبت به روش انتخابی حساس هستند و برخی از روش‌ها بسته به معیارهای ارزیابی بهتر از بقیه عمل می‌کنند. آنها استفاده از روش‌های ناپارامتری مبتنی بر KDE با هسته‌های گاوسی را برای استخراج SSI توصیه کردند.

در مطالعه‌ای Mallenahalli (2020) دو روش محاسبه شاخص SPI را مقایسه می‌کند. این دو روش عبارتند از روش پارامتری که توزیع گاما را برای بارندگی فرض می‌کند و روش ناپارامتری که هیچ توزیعی را در نظر نمی‌گیرد و از موقعیت‌های نمودار متفاوت برای تخمین احتمال وقوع خشک‌سالی استفاده می‌کند. این پژوهش، همچنین عملکرد هر دو روش را در تشخیص شروع، شدت و وسعت مکانی خشک‌سالی برای برخی از سال‌های خشک‌سالی منتخب مقایسه می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که روش ناپارامتری با شرایط خشک‌سالی مشاهده‌شده سازگارتر است و خشکی شدید را بهتر از روش پارامتری بیان می‌کند؛ لذا، روش ناپارامتری برای ارزیابی خشک‌سالی در هند مناسب‌تر است.

مطالعه اخیری که از یک روش ناپارامتری برای استخراج شاخص‌های خشک‌سالی استاندارد شده استفاده کرد توسط Li et al. (2023) انجام شد. آنها از کاپولا برای استخراج یک شاخص خشک‌سالی استاندارد چند متغیره بر اساس بارش و رطوبت خاک استفاده کردند. کاپولاها برای مدل‌سازی ساختار وابستگی بین چندین متغیر بدون مشخص کردن توزیع حاشیه‌ای آنها مفید هستند که می‌تواند برای داده‌های ناایستا یا چوله‌دار چالش برانگیز باشد. Li et al. (2023) از داده‌های تحلیل بارش چندماهواره‌ای (TMPA[2]) ماموریت اندازه‌گیری باران استوایی (TRMM[3]) داده‌های رطوبت خاک سیستم همانندسازی داده‌های زمین جهانی (GLDAS[4]) برای محاسبه SPI و SSI ناپارامتری استفاده کردند. سپس، آنها از کاپولاها برای ترکیب این دو شاخص در یک شاخص استفاده کردند که آن را شاخص خشک‌سالی استاندارد چند متغیره ناپارامتری (NMSDI[5]) نامیدند. آنها عملکرد NMSDI را در برابر داده‌های مشاهدات زمینی و سایر شاخص‌های خشک‌سالی در چین ارزیابی کردند و دریافتند که NMSDI قادر است الگوهای مکانی و زمانی خشک‌سالی را با دقت و هماهنگی بیشتری به تصویر بکشد.

[1] Multivariate standardized drought index
[2] Tropical multisatellite precipitation analysis
[3] Tropical rainfall measuring mission
[4] Global land data assimilation system
[5] Non-parametric multivariate standardized drought index

بحث و نتیجه‌گیری

خشک‌سالی به‌عنوان یک ویژگی ذاتی و تکرارپذیر اقلیمی، در اثر تغییر عناصر چرخه هیدرولوژیکی در ایران و سایر کشورهای جهان به وفور رخ می‌دهد. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که ایران در چند قرن پیش دچار خشک‌سالی‌های طولانی مدت و ویرانگر در هر چهار دسته خشک‌سالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی بوده است. شاخص‌هایی که از دیرباز برای پایش انواع مختلف خشک‌سالی پیشنهاد شده زمانی از دقت لازم برخوردارند که شرایط اقلیمی، محیطی و آب و هوایی پایدار یا به اصطلاح ایستا باشند. در شرایط ناپایدار آب و هوایی و محیطی که در اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به وجود می‌آید، مهمترین خصیصه این شاخص‌ها یعنی توابع توزیع احتمال آنها طی زمان، دست‌خوش تغییر شده و از اینروست که پارامترهای آنها بایستی مورد بازبینی قرار گیرند. در این راستا مرور تحقیقات گذشته در زمینه انواع مختلف شاخص‌های خشک‌سالی در حالت وجود/عدم ایستایی، ابزار مدلسازی آنها و تعیین محرک‌های ناایستایی که هدف مقاله حاضر است نتایج زیر را به همراه داشته است:

- مرور جدیدترین تحقیقات انجام شده طی یک دهه گذشته نشان داد که شاخص‌هایی مانند NSPI، NSRI، NSPEI و NRDI مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های ناایستا برای پایش خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی بوده‌اند.
- بررسی منابع گذشته نشان می‌دهد که در شرایط غیر ایستا پارامترهای توزیع احتمال در انواع مختلف شاخص‌های خشک‌سالی به عنوان تابع خطی یا غیر خطی از متغیرهای کمکی (عوامل ناایستایی) محاسبه می‌شوند.
- تحلیل ناایستایی در عمده تحقیقات، بر اساس فرض ایستا نبودن پارامتر مکان به عنوان مهمترین عامل در تابع توزیع احتمال شاخص‌های خشک‌سالی می‌باشد این بدان معنی است که برای محاسبه تابع توزیع احتمال در این حالت، پارامتر مکان به عنوان تابع چند متغیره از متغیرهای کمکی شامل زمان و سایر متغیرهای آب و هوا و اقلیمی در نظر گرفته می‌شود.
- از دیدگاه روش‌شناسی، در تمام تحقیقات گذشته از مدل تجمیعی تعمیم‌یافته برای مکان، مقیاس و شکل (GAMLSS) برای مدل‌سازی رفتار غیر ایستایی شاخص‌ها استفاده شده است.
- از میان متغیرهای آب و هواشناسی و نیز اقلیمی، الگوهای دورپیوندی همچون ENSO، NAO و AO پرکاربردترین متغیرهای کمکی برای تحلیل ناایستایی رفتار خشک‌سالی در مدل‌سازی GAMLSS بوده‌اند.
- اکثر مطالعات انجام شده عوامل زمان یا آب و هوا را به عنوان متغیرهای کمکی برای مدل‌سازی رفتار غیرایستای خشک‌سالی در نظر گرفته‌اند و تأثیر فعالیت‌های انسانی به ندرت در این تحلیل‌ها ملاحظه شده است.
- از منظر گستره مکانی بررسی موضوع ناایستایی خشک‌سالی، عمده تحقیقات مرتبط با کشورهایی چون ایران، کره جنوبی، چین و استرالیا بوده است.
- نتایج کلی این مقاله مروری نشان داد که گنجاندن عوامل ناایستا در شاخص‌های ایستای خشک‌سالی باعث پایش دقیق‌تر خشک‌سالی از منظر شدت و فراوانی وقوع آنها می‌شود.

با مرور کلی مطالعات صورت گرفته در زمینه روش‌های تحلیل ایستایی/ناایستایی خشک‌سالی با استفاده از رویکردهای پارامتری/ناپارامتری، پیشنهاد می‌شود که عملکرد روش‌های ناپارامتری و پارامتری در تحلیل خشک‌سالی ارزیابی و مقایسه شود. همچنین با انجام آنالیز حساسیت نقش متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی در کنار سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی برای تشریح رفتار ناایستایی بررسی گردد.

منابع

Abdelkader, M., & Yerdelen, C. (2022). Hydrological drought variability and its teleconnections with climate indices. Journal of Hydrology, 605, 127290.

Anvari, S., Moghaddasi, M., & Bagheri, M. H. (2023). Drought mitigation through a hedging-based model of reservoir-farm systems considering climate and streamflow variations. Theoretical and Applied Climatology, 152(1-2), 723-737.

Anvari, S., & Moghaddasi, M. (2023). Historical changes of extreme temperature in relation to soil moisture over different climatic zones of Iran. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 38: 157–173.

Anvari, S., & Moghaddasi, M. (2023). Exploring the Effects of Non-stationary and Diverse Covariates on Extreme Hot Events. ECOPERSIA, 11(4): 275-289.

Bazrafshan, J., & Hejabi, S. (2018). A non-stationary reconnaissance drought index (NRDI) for drought monitoring in a changing climate. Water Resources Management, 32, 2611-2624.

Bazrafshan, J., Cheraghalizadeh, M., & Shahgholian, K. (2022). Development of a Non-stationary Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (NSPEI) for Drought Monitoring in a Changing Climate. Water Resources Management, 36(10), 3523-3543.

Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation.
Bhuiyan, C. (2004). Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India. In Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey (pp. 12-23).

Byun, H. R., & Wilhite, D. A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. Journal of climate, 12(9), 2747-2756.

Carrão, H., Russo, S., Sepulcre-Canto, G., & Barbosa, P. (2016). An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. International journal of applied earth observation and geoinformation, 48, 74-84.

Chanda, K., & Maity, R. (2015). Meteorological drought quantification with standardized precipitation anomaly index for the regions with strongly seasonal and periodic precipitation. Journal of Hydrologic Engineering, 20(12):.

Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson Jr, E. G. (1980). On the definition of droughts. Water resources research, 16(2), 297-302.

Farahmand, A., & AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. Advances in Water Resources, 76, 140-145.

Fathian, F., & Vaheddoost, B. (2021). Conceptualization of the indirect link between climate variability and lake water level using conditional heteroscedasticity. Hydrological Sciences Journal, 66(13): 1907-1923.

Fathian, F., Amini, M., & Vaheddoost, B. (2021). A quantile-based realization of the indirect-link between large-scale atmospheric oscillation and lake water level. Arabian Journal of Geosciences, 14(24), 2721.

Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., & Hannah, D. M. (2011). Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. Hydrological Processes, 25(7), 1163-1179.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote sensing of environment, 58(3), 257-266.

Gibbs, W.J., Maher, J.V.,1967. Rainfall deciles as drought indicators. Bur. Meteorol., Bulletin No. 48, Melbourne, Australia.

Gommes, R., & Petrassi, F. (1994). Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960. FAO Agrometeorology Series Working Paper (FAO). no. 9

Gommes, R., & Petrassi, F. (1996). Rainfall variability and drought in sub-Saharan Africa. SD dimensions, FAO.

Hao, C., Zhang, J., & Yao, F. (2017). Multivariate drought frequency estimation using copula method in Southwest China. Theoretical and Applied Climatology, 127, 977-991.

Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. Advances in Water Resources, 57, 12-18.

Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2014). A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. Journal of Hydrometeorology, 15(1), 89-101.

Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 83(8), 1149-1166.

Hosseinzadeh Talaee, P., Tabari, H., & Sobhan Ardakani, S. (2014). Hydrological drought in the west of Iran and possible association with large-scale atmospheric circulation patterns. Hydrological Processes, 28(3), 764-773.

Huang, S., Huang, Q., Chang, J., & Leng, G. (2016). Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia River basin. International Journal of climatology, 36(1), 280-290.

Hunt, E. D., Hubbard, K. G., Wilhite, D. A., Arkebauer, T. J., & Dutcher, A. L. (2009). The development and evaluation of a soil moisture index. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 29(5), 747-759.

IPCC (2014) Climate change 2014: synthesis report.Contribution of working groups I II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team R.K.Pachauri and L.A.Meyer (eds.)]. IPCC Geneva Switzerland p151.

Jain, S. K., Keshri, R., Goswami, A., & Sarkar, A. (2010). Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: a case study for Rajasthan, India. Natural hazards, 54, 643-656.

Jehanzaib, M., Shah, S. A., Yoo, J., & Kim, T. W. (2020). Investigating the impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches. Journal of Hydrology, 588, 125052.

Jiang, S., Wang, M., Ren, L., Xu, C. Y., Yuan, F., Liu, Y., ... & Shen, H. (2019). A framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on hydrological drought in a semiarid basin of Northern China. Hydrological Processes, 33(7), 1075-1088.

Keyantash, J. A., & 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).

Kimwatu, D. M., Mundia, C. N., & Makokha, G. O. (2021). Developing a new socio-economic drought index for monitoring drought proliferation: a case study of Upper Ewaso Ngiro River Basin in Kenya. Environmental Monitoring and Assessment, 193, 1-22.

Li JZ, Wang YX, Li SF, Hu R (2015) A nonstationary standardized precipitation index incorporating climate indices as covariates. J Geophys Res Atmos 120(23):12082–12095.

Li, J. Z., Wang, Y. X., Li, S. F., & Hu, R. (2015). A nonstationary standardized precipitation index incorporating climate indices as covariates. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(23), 12-082.

Li, L., Ngongondo, C. S., Xu, C. Y., & Gong, L. (2013). Comparison of the global TRMM and WFD precipitation datasets in driving a large-scale hydrological model in southern Africa. Hydrology Research, 44(5), 770-788.

Li, X., Wang, Y., Zhang, L., & Liu, J. (2023). Non-parametric severity-duration-frequency analysis of drought based on copulas: a case study in China using satellite-based precipitation and soil moisture data sets. Environmental Science and Pollution Research, 30, 42087–42107

Liu, S., Huang, S., Xie, Y., Wang, H., Leng, G., Huang, Q., ... & Wang, L. (2019). Identification of the non-stationarity of floods: changing patterns, causes, and implications. Water Resources Management, 33, 939-953.

López, J., & Francés, F. (2013). Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. Hydrology and Earth System Sciences, 17(8), 3189-3203.

Mallenahalli, N. K. (2020). Comparison of parametric and nonparametric standardized precipitation index for detecting meteorological drought over the Indian region. Theoretical and Applied Climatology, 142(1-2), 219-236.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

Mehran, A., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(15), 7520-7533.

Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. Journal of Hydrology, 357(3-4), 282-302.

Meyer, S. J. (1990). The development of a crop specific drought index for corn. The University of Nebraska-Lincoln.

Meyer, S. J., Hubbard, K. G., & Wilhite, D. A. (1993). A crop-specific drought index for corn: I. Model development and validation. Agronomy Journal, 85(2), 388-395.

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management?. Science, 319(5863), 573-574.

Mishra A.K., Singh V.P.(2010) A review of drought concepts.J Hydrol391:202–216.

Mo, K. C., & Lettenmaier, D. P. (2014). Objective drought classification using multiple land surface models. Journal of Hydrometeorology, 15(3), 990-1010.

Moghaddasi, M., Anvari, S., & Mohammadi, T. (2022). Comparison of extreme value theory approaches in temperature frequency analysis (case study: Arak plain in Iran). Arabian Journal of Geosciences, 15(12), 1-13.)

Murray, E. J., & Sivakumar, V. (2010). Unsaturated Soils: A fundamental interpretation of soil behaviour. John Wiley & Sons.

Nalbantis I., Tsakiris G.(2009) Assessment of hydrological drought revisited.Water Resour Manag23:881–897

Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. Agricultural and forest meteorology, 133(1-4), 69-88.

Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. Agricultural and forest meteorology, 133(1-4), 69-88.

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.

Palmer, W. C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index.

Rashid, M. M., & Beecham, S. (2019). Development of a non-stationary Standardized Precipitation Index and its application to a South Australian climate. Science of the Total Environment, 657, 882-892.

Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. Remote Sensing of environment, 114(12), 2875-2887.

Romero, J., Olson, J. P., & Aspuru-Guzik, A. (2017). Quantum autoencoders for efficient compression of quantum data. Quantum Science and Technology, 2(4), 045001.

Russo, S., Dosio, A., Sterl, A., Barbosa, P. and Vogt, J., (2013). Projection of occurrence of extreme dry-wet years and seasons in Europe with stationary and nonstationary Standardized Precipitation Indices. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(14), pp.7628-7639.

Sánchez, N., González-Zamora, Á., Piles, M., & Martínez-Fernández, J. (2016). A new Soil Moisture Agricultural Drought Index (SMADI) integrating MODIS and SMOS products: A case of study over the Iberian Peninsula. Remote Sensing, 8(4), 287.

Sarhadi, A., Burn, D. H., Concepcion Ausin, M., & Wiper, M. P. (2016). Time-varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian copula. Water Resources Research, 52(3), 2327-2349.

Sepulcre-Canto, G., Horion, S. M. A. F., Singleton, A., Carrao, H., & Vogt, J. (2012). Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12(11), 3519-3531.

Shafer, B. A., & Dezman, L. E. (1982, January). Development of surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff areas. PROCEEDING OF THE WESTERN SNOW CONFERENCE.

Sharma, T. C., & Panu, U. S. (2010). Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers. Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques, 55(1), 79-92.

Sheffield, J., Wood, E. F., & Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. Nature, 491(7424), 435-438.

Shukla S., Wood A.W.(2008) Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought.Geophys Res Lett35:L02405.

Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical research letters, 35(2).

Singh, M., Muthuraman, S., & MacLeod, C. (2010). Identification of combustion failures in Gas Turbines using Artificial Neural Networks. In Proceedings of the 7th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 1, 722-732.

Su, C., & Chen, X. (2019). Assessing the effects of reservoirs on extreme flows using nonstationary flood frequency models with the modified reservoir index as a covariate. Advances in Water Resources, 124, 29-40.

Tarpley, J. D., Schneider, S. R., & Money, R. L. (1984). Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. Journal of Climate and Applied Meteorology, 491-494.

Telesca, L., Lovallo, M., Lopez-Moreno, I., & Vicente-Serrano, S. (2012). Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 391(4), 1662-1678.

Tijdeman, E., Stahl, K., & Tallaksen, L. M. (2020). Drought characteristics derived based on the standardized streamflow index: a large sample comparison for parametric and nonparametric methods. Water Resources Research, 56(9), e2019WR026315.

Tsakiris, G., & Vangelis, H. J. E. W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. European water, 9(10), 3-11.

Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I., Stahl, K., Hannaford, J., ... & Van Lanen, H. A. (2016). Drought in the Anthropocene. Nature Geoscience, 9(2), 89-91.

Van Rooy, M. P. (1965). A rainfall anomally index independent of time and space, notos.

Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J. A., & Krajewski, W. F. (2009). On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. Water Resources Research, 45(8).

Wang Y, Li J, Feng P, Hu R (2015) A time-dependent drought index for non-stationary precipitation series. Water Resour Manag 29:5631–5647.

Wang, Y., Duan, L., Liu, T., Li, J., & Feng, P. (2020). A non-stationary standardized streamflow index for hydrological drought using climate and human-induced indices as covariates. Science of the Total Environment, 699, 134278.

Wang, Y., Li, J., Feng, P., & Hu, R. (2015). A time-dependent drought index for non-stationary precipitation series. Water Resources Management, 29, 5631-5647.

Wang, Y., Peng, T., Lin, Q., Singh, V. P., Dong, X., Chen, C., & Wang, G. (2022). A new non-stationary hydrological drought index encompassing climate indices and modified reservoir index as Covariates. Water Resources Management, 36(7), 2433-2454.

Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In D. A. Wilhite (Ed.), Drought: A global assessment (Vol. 1, pp. 3-18). London: Routledge.

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

Wilhite, D. A., Sivakumar, M. V. K., & Pulwarty, R. (2014). Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. Weather and Climate Extremes, 3, 4–13.

Williams, A. P., Cook, E. R., Smerdon, J. E., Cook, B. I., Abatzoglou, J. T., Bolles, K., & Livneh, B. (2020). Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. Science, 368(6488), 314-318.

Wu, J., Liu, Z., Yao, H., Chen, X., Chen, X., Zheng, Y., & He, Y. (2018). Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought. Journal of Hydrology, 563, 726-736.

Xiaosheng, J., Xianwei, Y., Lijuan, C., & Youmin, W. (1997). Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China. 8(1), 26-33.

Xing, Z., Ma, M., Wei, Y., Zhang, X., Yu, Z., & Yi, P. (2020). A new agricultural drought index considering the irrigation water demand and water supply availability. Natural Hazards, 104, 2409-2429.

Xiong, L., & Guo, S. (2004). Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station/Test de tendance et détection de rupture appliqués aux séries de débit annuel du fleuve Yangtze à la station hydrologique de Yichang. Hydrological sciences journal, 49(1), 99-112.

Xu, K., Yang, D., Xu, X., & Lei, H. (2015). Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China. Journal of Hydrology, 527, 630-640.

Xu, Y., Wang, L., Ross, K. W., Liu, C., & Berry, K. (2018). Standardized soil moisture index for drought monitoring based on soil moisture active passive observations and 36 years of north American land data assimilation system data: A case study in the southeast United States. Remote Sensing, 10(2), 301.