



Remote sensing-based drought monitoring in Tehran city using nonparametric SPI

Arezoo Ariyaei¹  | Ahmad Sharafati² 

1. Department of Civil Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: ariyaeiarezoo@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: asharafati@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 1 July 2024

Received in revised form

15 September 2024

Accepted 4 November 2024

Published online 10 February 2025

Keywords:

Correlation

Drought

Remote Sensing

TRMM

ABSTRACT

Today, drought is considered a dangerous phenomenon in various regions of the world, including Iran. This fact necessitates drought monitoring and the use of remote sensing tools to determine the intensity and duration of drought. In the current study, drought in the study area of Tehran city was determined based on observational and remote sensing rainfall data. For this purpose, TRMM satellite precipitation products were extracted between 1998 and 2019 using the coding tool in Google Earth Engine. Then, the drought of the region was monitored based on the non-parametric standardized precipitation index (SPI) and observational and remote sensing precipitation data for 3, 6, and 12 months' time scales. In this context, the relationship between satellite precipitation and observations was determined using the bootstrap method. Also, to deeply examine the TRMM satellite precipitation and the measured precipitation data, the correlation between observed and satellite drought in the different time scales was estimated using Spearman, Kendall, Point-biserial and Pearson statistical methods. Finally, using RMSE and NS, the error in estimating rainfall and drought based on TRMM satellite products was calculated. Validation results showed that the calculated SPI based on TRMM rainfall data on a 6-month scale had less error. According to the findings, the RMSE and NS values for the 6-month drought estimation were 0.873 and 0.028, respectively. Additionally, the results showed that the drought in the study area between 1998 and 2019 exhibited an increasing trend.

Cite this article: Ariyaei, A., & Sharafati, A. (2025). Remote sensing-based drought monitoring in Tehran city using nonparametric SPI. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (4), 969-988.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.378794.1171>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.378794.1171>

Publisher: University of Tehran Press.



پایش خشک‌سالی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور شهر تهران بر اساس SPI ناپارامتریک

آرزو آریایی^۱ | احمد شرافتی^۲۱. دانشکده مهندسی عمران، واحد غرب تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ariyaiearezoo@gmail.com۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: asharafati@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه پدیده خشک‌سالی یک رخداد مخاطره‌آمیز در مناطق مختلف جهان از جمله ایران به‌شمار می‌رود. مدیریت این پدیده، لزوم پایش خشک‌سالی و استفاده از ابزارهای سنجش از دور را به‌منظور تعیین شدت و زمان خشک‌سالی ایجاب می‌کند. در مطالعه حاضر، خشک‌سالی محدوده مطالعاتی شهر تهران بر اساس داده‌های بارش مشاهداتی و سنجش از دور تعیین گردیده است. در این راستا، تولیدات بارش ماهواره TRMM^۱ در بازه سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ با استفاده از ابزار کدنویسی در Google Earth Engine استخراج شد. سپس خشک‌سالی منطقه بر اساس شاخص استاندارد شده بارش (SPI)^۲ ناپارامتریک و داده‌های بارش مشاهداتی و سنجش از دور برای مقیاس‌های زمانی سه، شش و ۱۲ ماهه پایش گردید. در این زمینه، ارتباط میان بارش ماهواره‌ای و مشاهداتی با استفاده از روش بوت‌استرپ^۳ محاسبه و تحلیل شد. سپس، با استفاده از دو معیار RMSE^۴ و NS^۵ خطای برآورد بارش و خشک‌سالی محاسبه‌شده بر اساس تولیدات ماهواره TRMM تعیین گردید. نتایج اعتبارسنجی نشان دادند SPI محاسباتی بر اساس داده‌های بارش TRMM در مقیاس شش‌ماهه دارای خطای کم‌تری می‌باشد. با توجه به یافته‌ها، مقادیر RMSE و NS در برآورد خشک‌سالی شش‌ماهه به‌ترتیب برابر ۰/۸۷۳ و ۰/۰۲۸ است. به‌علاوه، به‌منظور بررسی دقیق‌تر محصولات بارش ماهواره TRMM و داده‌های بارش اندازه‌گیری‌شده، با استفاده از روش‌های آماری اسپیرمن^۶، کندال^۷، دو رشته‌ای نقطه‌ای^۸ و پیرسن^۹، همبستگی میان خشک‌سالی زمینی و ماهواره‌ای در مقیاس‌های مختلف برآورد شد. نتایج نشان دادند با افزایش مقیاس زمانی تخمین خشک‌سالی هواشناسی، همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی افزایش می‌یابد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

کلیدواژه‌ها:

خشک‌سالی

سنجش از دور

ماهواره TRMM

همبستگی

استناد: آریایی، آرزو و شرافتی، احمد (۱۴۰۳). پایش خشک‌سالی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور شهر تهران بر اساس SPI ناپارامتریک. نشریه مدیریت آب

و آبیاری، ۱۴ (۴)، ۹۶۹-۹۸۸. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.378794.1171>

۱. مقدمه

چالش‌های وارد بر پیکره‌های آبی شامل تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و کاهش بارش، می‌تواند باعث تشدید پدیده‌های حادی مانند خشک‌سالی شود. همچنین خشک‌سالی‌های پی‌درپی موجب مخاطرات و هزینه‌های جانی و مالی شده (Farahani and Jahansoozi, 2022) که در دراز مدت پایداری اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sheffield *et al.*, 2012) و به جوامع شهری آسیب فراوان وارد می‌کند (Savari *et al.*, 2023). به‌طور کلی خشک‌سالی به یک دوره پیوسته گفته می‌شود که مقدار بارش به‌صورت غیرمنتظره‌ای کاهش می‌یابد (Glantz and Wilhite, 1985). این پدیده در سطح جهانی به‌عنوان یکی از ویران‌گرترین بلاهای طبیعی شناخته شده است که در صورت وقوع مکرر و طولانی منجر به خسارت‌های اقتصادی قابل توجه و چالش‌های پیچیده اجتماعی و زیست‌محیطی عدیده‌ای می‌شود (Hagman *et al.*, 2017; Halwatura *et al.*, 2017; Rahman *et al.*, 2023; Pourzand and Noy., 2022; Ahmad *et al.*, 2022; 1984) به‌این‌منظور، بررسی شدت، زمان و پایش خشک‌سالی امری ضروری در مدیریت منابع آب است.

از شاخص‌های مختلفی به‌منظور کمی‌سازی خشک‌سالی استفاده می‌گردد. رایج‌ترین این شاخص‌ها، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)^۱، بارش استاندارد (SPI)، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI)^{۱۱} و شاخص دمای سطح زمین (LST)^{۱۲} است. از میان معیارهای ذکرشده، شاخص SPI که توسط McKee *et al.* (1993) ایجاد شده است، یکی از پرکاربردترین و مرسوم‌ترین روش‌های تعیین شاخص‌های خشک‌سالی است که در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (Pande *et al.*, 2023; Sharafi *et al.*, 2022; Tsesmelis *et al.*, 2022; Hayes *et al.*, 2011; Logan *et al.*, 2010; Sakellariou *et al.*, 2024; *al.*, 2010). محبوبیت SPI از سادگی و توانایی آن در تفسیر داده‌های بارندگی در بازه‌های زمانی مختلف (یک تا ۲۴ ماه) برای ارزیابی جنبه‌هایی مانند مدت زمان، شدت، بزرگی و فراوانی خشک‌سالی ناشی می‌شود (Khadr *et al.*, 2009). از شاخص SPI همچنین در مطالعاتی که بر کشور ایران، به‌منظور بررسی خشک‌سالی انجام شده، استفاده شده است (Razmi *et al.*, 2022; Mianadabi *et al.*, 2022; Bazrafshan *et al.*, 2023; Fathian *et al.*, 2024). در مطالعه‌ای که توسط Shirmohammadi *et al.* (2013) به‌منظور پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی ارائه شد، شاخص SPI به‌عنوان یک شاخص مناسب برای ارزیابی دوره‌های خشک‌سالی در ایران معرفی شد. همچنین، Khanmohammadi *et al.* (2022) در پژوهشی که به بررسی خشک‌سالی ایران بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۴ پرداختند، نه شاخص خشک‌سالی مبتنی بر بارش را مقایسه کرده‌اند. نتایج این مقاله شاخص SPI را به‌عنوان بهترین شاخص برای تحلیل خشک‌سالی در ایران انتخاب کرده است، زیرا به‌خوبی با داده‌های بارش سازگار بوده و توانسته است خشک‌سالی‌های شدید را به‌دقت شناسایی کند. به همین صورت، در ادامه توسعه روش‌های تعیین خشک‌سالی، پیش‌بینی شاخص SPI موردتوجه پژوهش‌گران زیادی قرار گرفته است، با این‌حال، SPI معمولاً با برازش توزیع احتمال گاما^{۱۳} به داده‌های بارش به‌دست می‌آید. برای نیل به این هدف، احتمال گامای تجمعی درنهایت به تابع توزیع تجمعی و توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌شود. باوجود استفاده رایج از گاما، شایان ذکر است که توزیع گامای دو پارامتری^{۱۴} ممکن است همیشه انتخاب بهینه توزیع برای برآورد خشک‌سالی نباشد (Quiring, 2009; Guttman, 1999). به‌عبارت دیگر، از آنجایی که توزیع احتمال بارندگی در شرایط مختلف آب‌وهوایی متفاوت است، رویکرد پارامتریک به SPI ممکن است منجر به نتایج ناهماهنگ شود (Farahmand and AghaKouchak, 2015). بنابراین Farahmand and AghaKouchak (2015) یک شاخص استاندارد تک‌متغیره و چندمتغیره ناپارامتریک را برای ارزیابی خشک‌سالی در متغیرهای مختلف آب‌وهوایی معرفی کردند که ضعف‌های شاخص پارامتریک را کاهش دهد. این شاخص ناپارامتریک در مطالعه حاضر نیز به‌کار گرفته شده است.

پایش خشک‌سالی هواشناسی به‌عنوان مهم‌ترین نوع شاخص خشک‌سالی بر اطلاعات بارش تکیه می‌کند، با این حال به‌دلیل دستیابی سخت به اطلاعات زمان واقعی با محدودیت‌های زیادی روبه‌رو است (Thenkabail *et al.*, 2004). به‌منظور حل این چالش داده‌های سنجش از دور می‌تواند به‌صورت گسترده‌ای کارا باشند. به‌عبارت دیگر، اگرچه روش پایش خشک‌سالی هواشناسی به‌خوبی اثبات شده است و مطالعات متعددی از لحاظ تاریخی برای پایش خشک‌سالی بر آن تکیه کرده‌اند (Santos *et al.*, 2010; Mokhtar *et al.*, 2021)، در دسترس‌بودن مشاهدات محلی از ایستگاه‌های سینوپتیک در مناطق مختلف با محدودیت‌هایی مواجه است (Ragab and Prudhomme, 2002). علاوه‌براین، کمبود ایستگاه‌های پایش و مشاهدات تاریخی ناکافی می‌تواند به چالش‌هایی در پایش خشک‌سالی منجر شود (Easterling, 2013). برای حل چنین چالش‌هایی، داده‌های سنجش از دور می‌تواند کارایی بالایی داشته باشد و از این‌رو در مطالعات بسیاری استفاده شده‌اند (Ghozat *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022; Pandey *et al.*, 2022; Dejene *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). با این وجود که به‌تازگی، اتخاذ رویکردهای سنجش از دور گزینه‌های جدیدی را برای پایش رویدادهای شدید هواشناسی فراهم کرده است (AghaKouchak *et al.*, 2015; Suliman *et al.*, 2020; de Brito *et al.*, 2021)، تصاویر سنجش از دور قدیمی مربوط به اواسط دهه ۱۹۸۰ که بر پایه امواج مادون قرمز استخراج شده‌اند، در تخمین بارش دقت مناسبی ندارند. خروجی محصولات جدید ماهواره‌ای که از ترکیب امواج ماکروویو و مادون قرمز بهره می‌برند، تفاوت قابل‌توجه‌ای با محصولات گذشته دارند (Ward *et al.*, 2011). بنابراین نیاز است تا تولیدات این ماهواره‌ها به‌منظور تخمین بارش و دیگر پارامترهای هیدرولوژیکی مورد‌ارزیابی قرار گیرد. به‌طور مثال، ماهواره TRMM که در مطالعه حاضر استفاده شده است، حامل ابزار تصویربرداری مایکروویو TMI^{۱۵} بوده که اطلاعات مفیدی درباره محتوای ستون بارش، آب محتوای ابر، یخ محتوای ابر و شدت بارش تولید می‌کند (Bodghjamali *et al.*, 2020). Al-Kilani *et al.* (2021) در مطالعه‌ای به ارزیابی تخمین‌های بارش داده‌های ماهواره NASA POWER^{۱۶} و SPI^{۱۷} مشتق‌شده از آن‌ها برای بررسی خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک اردن پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان داده است که داده‌های سنجش از دور می‌توانند جایگزین مناسبی برای داده‌های زمینی در مناطقی با دسترسی محدود به ایستگاه‌های هواشناسی باشند و شاخص استاندارد بارش SPI به‌دست‌آمده از داده‌های ماهواره‌ای، خشک‌سالی‌های شدید را به‌خوبی نشان می‌دهند. هم‌چنین، در مطالعه‌ای که توسط Pazhanivelan *et al.* (2023)، با هدف بررسی خشک‌سالی در ایالت تامیل نادو، هند، طی سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ انجام شده، عملکرد محصولات بارش از چهار ماهواره‌ی مختلف، شامل IMERGH^{۱۷}، TRMM، CHIRPS^{۱۸} و PERSIANN^{۱۹} ارزیابی شدند. این ارزیابی از طریق محاسبه شاخص استاندارد بارش SPI و مقایسه نتایج با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی انجام شد. نتایج نشان داد که برآوردهای بارش IMERGH و TRMM برای شرایط کم‌بارش قابل‌اعتماد هستند، درحالی‌که داده‌های CHIRPS برای شرایط بارش بالا، دقت بالایی دارند. پژوهش ذکرشده به مزایای استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای برای ارزیابی و مدیریت مؤثر خشک‌سالی اشاره می‌کند و نشان می‌دهد که این داده‌ها می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی در بهبود نظارت بر خشک‌سالی کمک کنند.

روش بوت‌استرپ یک روش آماری است که برای ارزیابی دقت آماری مانند میانگین، واریانس، یا فواصل اطمینان از داده‌ها استفاده می‌شود (Efron, 1992; Liu *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2015; Vergni *et al.*, 2017). در پژوهش حاضر با استفاده از روش بوت‌استرپ تحلیلی از روابط میان داده‌های بارش ماهواره‌ای و مشاهده‌ای انجام می‌شود تا بینشی معتبر از عدم قطعیت داده‌های ماهواره‌ای TRMM به‌دست آید و تحلیلی عمیق‌تر از عملکرد داده‌های TRMM در برآورد SPI ناپارامتریک صورت گیرد.

در این مطالعه قصد بر این است تا با استفاده از داده‌های بارش مشاهداتی و سنجش از دور TRMM، مقایسه‌ای

به‌منظور عملکرد این داده‌ها در تخمین خشک‌سالی و بارش شهر تهران انجام گیرد. به‌این‌منظور، با استفاده از شاخص SPI سه، شش و ۱۲ ماهه وضعیت خشک‌سالی منطقه تعیین می‌گردد. همچنین برای برآورد دقت محاسبه شدت خشک‌سالی توسط داده‌های سنجش از دور، معیارهای خطای NS و RMSE مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌علاوه، در این مطالعه با تکیه بر تحلیل‌های همبستگی مختلف، آنالیز معتبری از SPI به‌دست‌آمده از داده‌های TRMM انجام می‌شود. تحلیل‌های همبستگی ابزارهای آماری هستند که برای بررسی و اندازه‌گیری رابطه بین دو یا چند متغیر به‌کار می‌روند (Katipoğlu et al., 2020). به‌دنبال بررسی اختلاف بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای براساس بوت‌استرپ، از روش‌های آماری اسپیرمن، کندال، دو رشته‌ای نقطه‌ای و پیرسن به‌منظور تعیین همبستگی بین داده‌های خروجی خشک‌سالی ماهواره‌ای و زمینی استفاده می‌شود. نوآوری این پژوهش نه‌تنها در استفاده از روش‌های متعدد آماری به‌منظور بررسی چندوجهی ارتباط بین داده‌های ماهواره‌ای و مشاهداتی خشک‌سالی نهفته است بلکه در به‌کارگیری روش بوت‌استرپ برای تعیین عدم قطعیت تخمین بارش با تکیه بر ابزارهای سنجش از دور می‌باشد. نتایج این مطالعه این امکان را به تصمیم‌گیرندگان می‌دهد تا با در نظر گرفتن خطرات پیش‌رو به مدیریت بهینه منابع آب در شرایط خشک‌سالی و ترسالی پرداخته و درک عمیق‌تری نسبت به استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پایش خشک‌سالی داشته باشند.

۲. مواد و روش‌ها

در این مطالعه قصد بر این است تا با استفاده از داده‌های بارش مشاهداتی و سنجش از دور مقایسه‌ای به‌منظور عملکرد داده‌های ماهواره TRMM در تخمین خشک‌سالی و بارش انجام گیرد. به‌همین‌منظور، ابتدا داده‌های بارش روزانه مشاهداتی و ماهواره‌ای TRMM برداشت می‌شود. سپس با استفاده از روش بوت‌استرپ روابط میان بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، با استفاده از شاخص SPI سه، شش و ۱۲ ماهه وضعیت خشک‌سالی منطقه تعیین می‌گردد. سپس براساس معیارهای خطای NS و RMSE دقت برآورد شدت خشک‌سالی حوضه مورد مطالعه توسط داده‌های سنجش از دور برآورد شده و با SPI حاصل از داده‌های مشاهداتی مقایسه می‌شود. به‌علاوه، در مطالعه حاضر از روش‌های آماری اسپیرمن، کندال، دو رشته‌ای نقطه‌ای و پیرسن به‌منظور تعیین همبستگی بین داده‌های خروجی خشک‌سالی ماهواره‌ای و زمینی استفاده می‌شود تا بررسی عمیق‌تری از نتایج به‌عمل آید. نمودار جریان کلی کار در شکل (۱) نمایش داده شده است.

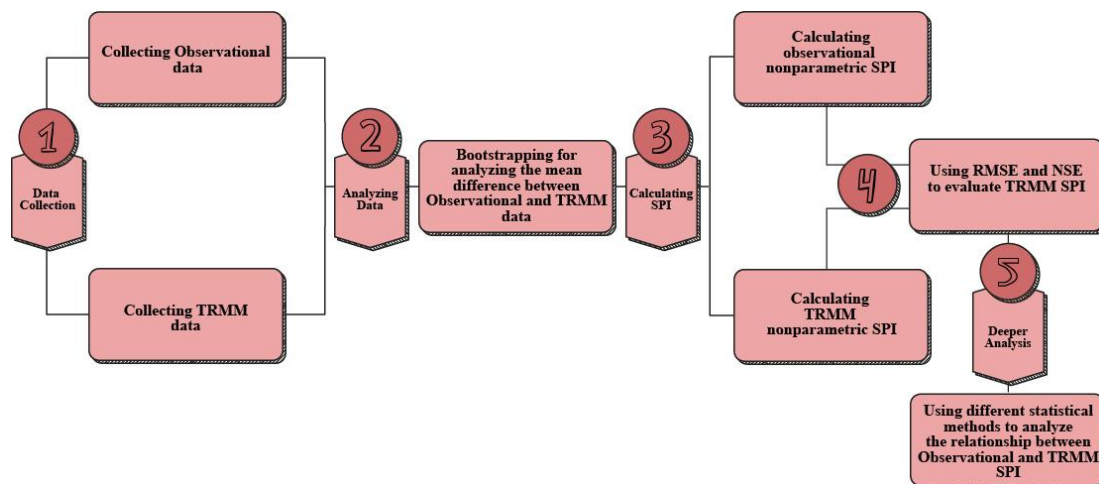


Figure 1. Flowchart of the current study

۱.۲. جمع آوری داده

در اولین مرحله پژوهش، داده‌های مشاهداتی مربوط به شهر تهران از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ برداشت شد. به این منظور داده‌های بارش ایستگاه مهرآباد به جهت تعیین مقادیر شاخص خشک‌سالی مورداستفاده قرار می‌گیرد. همچنین داده‌های بارش سه ساعته سنجنده TRMM با محصول ۳B۴۲ به منظور مقایسه با داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی خشک‌سالی به کار گرفته می‌شود. محصولات سنجنده TRMM با تفکیک مکانی ۰/۲۵ می‌تواند در مناطقی که دسترسی به اطلاعات هواشناسی چالش برانگیز باشد، مورداستفاده قرار گیرد. در مطالعه حاضر، به وسیله ابزار Google Earth Engine داده‌های بارش سه ساعته استخراج و به داده‌های ماهانه تبدیل شد تا برای تخمین خشک‌سالی استفاده شود.

۲.۲. محدوده مطالعاتی

شهر تهران در دامنه جنوبی رشته کوه البرز واقع شده است. این شهر از شمال تحت تأثیر آب‌وهوای معتدل و از جنوب به مناطق گرم و خشک منتهی می‌شود (شکل ۲). میانگین بارندگی سالانه این منطقه طی یک دوره ۵۵ ساله ۳۳۳ میلی‌متر است، با ذکر این که بخش مهمی از بارش‌ها در ماه‌های آذر تا اردیبهشت رخ می‌دهد (Fahimi Nezhad *et al.*, 2019). همچنین میانگین دمای سالانه منطقه مورد مطالعه بین ۱۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است (Habibi and Hourcade, 2005). با توجه به این که شهر تهران به عنوان پایتخت کشور کماکان با روند رو به رشد جمعیت مواجه است، خشک‌سالی و کمبود آب می‌تواند به طرز قابل توجهی دارای اهمیت باشد. بر مبنای گزارش‌های اخیر مرکز ملی پایش و هشدار خشک‌سالی، طی یک دوره هفت ساله تا پایان آبان ماه ۹۷-۱۳۹۶، در حدود ۴۲/۳ درصد از گستره شهر تهران تحت تأثیر خشک‌سالی متوسط و ۳۵/۶ درصد از گستره این شهر تحت تأثیر خشک‌سالی شدید قرار داشته است (MOTP, 2018). لذا امکان‌سنجی استفاده از روش‌های معتبر برای پایش خشک‌سالی این منطقه ضروری است. در مطالعه حاضر عملکرد داده‌های ماهواره TRMM به منظور پایش خشک‌سالی شهر تهران طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ بررسی می‌شود، تا بینشی از اعتبار داده‌های این ماهواره در بررسی خشک‌سالی این منطقه به دست آید.

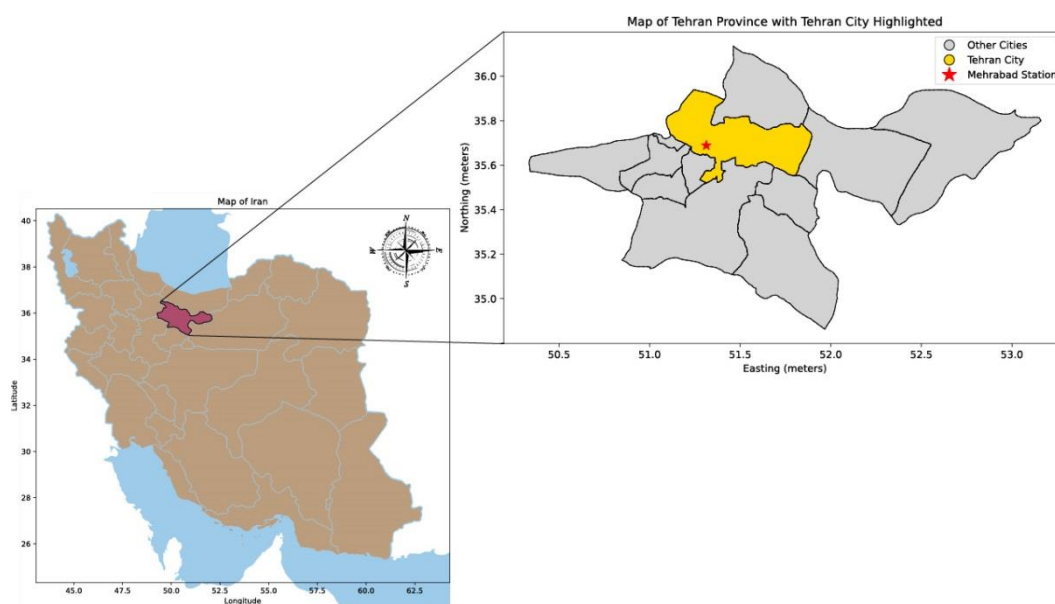


Figure 2. Iran's map and position of Mehrabad station in Tehran City

ایستگاه مهرآباد ۱۱۹۱ متر از سطح آب‌های آزاد ارتفاع دارد و با عرض جغرافیایی ۳۵/۶۸ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱/۳۱ درجه شرقی، در جنوب غرب شهر تهران قرار دارد. این ایستگاه به‌عنوان یکی از ایستگاه‌های قدیمی سینوپتیک در ایران در سال ۱۹۴۲ تأسیس شده و داده‌های بلندمدت مختلفی را در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد. در شهر تهران تنها ایستگاه مهرآباد دارای داده‌های بالای ۵۰ سال است و به همین علت در این پژوهش تنها از داده‌های این ایستگاه استفاده شده است.

۳.۲. شاخص بارش استاندارد شده غیر پارامتریک (SPI)

شاخص‌های بارش استاندارد شده پارامتری مرسوم از کمبودهایی از جمله ناسازگاری زمانی و غیرقابل مقایسه آماری رنج می‌برند (Farahmand and AghaKouchak, 2015). در این پژوهش از خشک‌سالی استاندارد شده ناپارامتریک استفاده شده است که توسط Farahmand and AghaKouchak (2015) برای غلبه بر چنین مسائلی معرفی شده است و نیازی به فرض توزیع پارامتری معروف را از بین می‌برد. شاخص استاندارد شده ناپارامتری SI را می‌توان با استفاده از احتمال تجربی به دست آورد. در این مورد، موقعیت ترسیم گرینگورتن تجربی استفاده می‌شود (Gringorten, 1963):

$$p(x_i) = \frac{i-0.44}{n+0.12} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق، n نشان‌دهنده اندازه نمونه، i رتبه داده‌های بارش غیر صفر از کوچک‌ترین و $p(x_i)$ نشان‌دهنده احتمال تجربی مربوطه است. نتایج به دست آمده توسط این معادله به صورت SI نشان داده می‌شود:

$$SI = \Phi^{-1}(p) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در اینجا، Φ نماد تابع توزیع نرمال استاندارد و p نشان‌دهنده احتمال به دست آمده از معادله پیشین است. علاوه بر این، استانداردسازی صدک‌ها را می‌توان به‌طور سیستماتیک با استفاده از تقریب معمولی که در رابطه (۲) نشان داده شده است، انجام داد (Abramowitz et al., 1968; Edwards, 1997; Naresh Kumar et al., 2009):

$$t = \begin{cases} -(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) & \text{if } 0 < p \leq 0.5 \\ +(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) & \text{if } 0.5 < p \leq 1 \end{cases} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}} \\ \sqrt{\ln \frac{1}{(1-p)^2}} \end{cases}$$

که در آن،

$$c_0 = 2.515517; c_1 = 0.802583; c_2 = 0.010328; d_1 = 1.432788; d_2 = 0.189269; d_3 = 0.001308$$

جدول (۱) بازه‌های مختلف SPI را نشان می‌دهد.

Table 1. Degree of drought and waterlog based on SPI index

Category	Value SPI
Extreme wet	2 and above
Severe wet	1.50 – 1.99
Moderate wet	1.00 – 1.49
Normal	0.99 – -0.99
Moderate drought	-1.00 – -1.49
Severe drought	-1.50 – -1.99
Extreme drought	-2 and below

۴.۲. روش بوت‌استرپ

بوت‌استرپ یک روش نمونه‌برداری مبتنی بر تکرار است که ابتدا داده‌های موجود را بدون جایگزینی نمونه‌گیری کرده و سپس از این نمونه‌ها با جایگزینی به تعداد بارها نمونه‌گیری می‌کند (Efron, 1992). این فرایند با اعمال یک روش تخمینی

موردعلاقه، مثلاً محاسبه میانگین یا میانه، بر روی هر نمونه، میانگین‌های تقریبی جدیدی از جمعیت ایجاد می‌کند. سپس، با تجمع تمام این تخمین‌ها، بازه‌های اطمینان موردنظر محاسبه می‌شوند. این روش یک ابزار آماری بسیار کاربردی و قدرتمند است که می‌تواند به منظور تعیین کمیت عدم قطعیت مرتبط با یک برآوردگر معین یا روش یادگیری آماری استفاده شود. در واقع بوت‌استرپ می‌تواند یک تخمین قوی از یک پارامتر جمعیت مانند انحراف استاندارد، میانگین، میانه، خطای استاندارد استخراج کند.

۵.۲. اعتبارسنجی

مقایسه مقادیر واقعی یا مشاهداتی با مقادیر تخمین‌زده شده براساس داده‌های ماهواره‌ای، مستلزم ارزیابی‌های تخمینی می‌باشد. برای این منظور، از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (Jain and Sudheer, 2008) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) (Gupta and Kling, 2009) استفاده می‌شود. با استفاده از این معیارهای عملکردی، مقادیر تخمینی قابل ارزیابی و تحلیل می‌باشد. معیار خطای RMSE میزان خطا را به صورت عددی همواره مثبت بیان می‌کند. به این ترتیب که هر چقدر این مقدار کوچک‌تر باشد، خطای کم‌تری در تخمین رخ داده است. مقدار به دست آمده توسط این معیار عددی بی‌بعد می‌باشد. همچنین مقدار عددی معیار خطای NSE بازه‌ای از منفی بی‌نهایت تا یک را اختیار می‌کند. به صورتی که هرچه این مقدار عددی به یک نزدیک‌تر باشد، مقادیر تخمینی خطای کم‌تری دارد. همچنین هرچقدر مقدار این معیار به سمت صفر و پس از آن عددی منفی باشد دقت داده‌های تخمینی پایین‌تر می‌باشد. مقدار خطای RMSE و NSE به ترتیب از طریق روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

در روابط فوق، x_i مقدار تخمینی و x_j مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین n بیانگر تعداد مقایسه‌ها است.

۶.۲. آزمون‌های همبستگی

همبستگی یکی از مفاهیم اساسی در آمار و احتمالات است که در تحلیل داده‌ها و ارتباطات بین متغیرها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر، از روش‌های همبستگی اسپیرمن، کندال، پیرسن و دو رشته‌ای نقطه‌ای به منظور بررسی ارتباط بین خشک‌سالی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و زمینی استفاده می‌شود. به طور کلی، روش همبستگی پیرسن به طور خاص برای بررسی ارتباط بین متغیرهایی که توزیع نرمال دارند و رابطه خطی دارند مناسب است. اما در صورتی که توزیع داده‌ها ناهمبسته باشد یا روابط غیرخطی وجود داشته باشد، استفاده از روش‌های همبستگی غیرپارامتری مانند اسپیرمن و کندال توصیه می‌شود.

۶.۲.۱. همبستگی اسپیرمن

همبستگی اسپیرمن یک روش برای اندازه‌گیری رابطه غیرخطی بین دو متغیر رتبه‌ای است. این روش از ضریب همبستگی ترتیبی (که براساس رتبه‌بندی داده‌ها محاسبه می‌شود)، استفاده می‌کند (Hauke and Kossowski, 2011). ضریب همبستگی اسپیرمن در بازه $[-1, 1]$ قرار دارد که عدد صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده همبستگی مستقیم و مقادیر منفی نشان‌دهنده همبستگی معکوس است. روش همبستگی اسپیرمن برای داده‌هایی که توزیع آن‌ها نرمال نیست مناسب است.

۲.۶.۲. همبستگی کندال

همبستگی کندال نیز برای اندازه‌گیری همبستگی بین دو متغیر رتبه‌ای استفاده می‌شود (Abdi, 2007). این روش براساس تعداد ترتیب‌های رتبه‌بندی متغیرها اعمال می‌شود و میزان اتفاق رخ دادن ترتیب‌های متغیرها را با هم مقایسه می‌کند. همبستگی کندال نیز در بازه $[-1, 1]$ قرار دارد و به صورت مشابه با همبستگی اسپیرمن تفسیر می‌شود. این روش نیز برای داده‌هایی که توزیع آن‌ها نرمال نیست مناسب است.

۲.۶.۳. همبستگی پیرسن

روش همبستگی پیرسن یکی از اصولی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های همبستگی در آمار و علوم آب است. این روش برای اندازه‌گیری ارتباط خطی بین دو متغیر پیوسته استفاده می‌شود (Hauke and Kossowski, 2011). ایده اصلی این است که اگر دو متغیر به صورت خطی با یکدیگر مرتبط باشند، همبستگی آن‌ها بیش تر خواهد بود. برای محاسبه همبستگی پیرسن، میانگین و انحراف معیار هر دو متغیر محاسبه می‌شود، سپس کوواریانس بین دو متغیر و در نهایت همبستگی به عنوان نسبت کوواریانس به حاصل ضرب انحراف معیارها محاسبه می‌شود. این روش مقادیر همبستگی را در بازه $[-1, 1]$ تعیین می‌کند، که ۱ نشان‌دهنده همبستگی مثبت کامل و -۱ نشان‌دهنده همبستگی منفی کامل و صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی است.

۲.۶.۴. همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای

همبستگی دورشته‌ای نقطه‌ای برای اندازه‌گیری همبستگی بین یک متغیر دودویی (دارای دو دسته) و یک متغیر پیوسته استفاده می‌شود (Kornbrot, 2014). این روش براساس میانگین متغیر پیوسته برای هر دسته از متغیر دودویی محاسبه می‌شود و میزان تفاوت بین این میانگین‌ها نشان‌دهنده همبستگی است. همبستگی دو رشته‌ای نقطه‌ای نیز در بازه $[-1, 1]$ قرار دارد و تفسیر مشابهی با همبستگی پیرسن دارد. این روش برای داده‌هایی که یکی از متغیرها دودویی و دیگری پیوسته است مناسب است.

۳. نتایج و بحث

در ابتدای پژوهش حاضر، داده‌های بارش ماهواره TRMM و همچنین بارش مشاهداتی ایستگاه مهرآباد از داده‌های روزانه به داده‌های ماهانه تبدیل شده و میانگین بارش ماهانه در طول بازه مورد مطالعه (۱۹۹۸-۲۰۱۹) تعیین گردیده است. نتایج بارش میانگین ماهانه مشاهداتی و تخمینی TRMM در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به جدول (۲) تمامی مقادیر برآورده شده بارش میانگین در تمام ماه‌ها کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بارش تخمینی توسط ماهواره TRMM در منطقه مورد مطالعه به طور قابل توجهی مقدار بارش پایین تری را تخمین می‌زند.

Table 2. Average monthly rainfall from observations and TRMM satellite from 1998 to 2019

Month	Monthly average rainfall (1998-2019)	
	Observed	TRMM
January	1.9	0.9
February	1.7	0.8
March	2.2	1.0
April	2.1	1.3
May	0.8	0.5
June	0.1	0.1
July	0.1	0.1
August	0.1	0.1
September	0.0	0.1
October	1.2	0.5
November	1.8	0.8
December	2.3	0.7

شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب، برآورد بارش تجمعی سالانه، و توزیع بارش سالانه را برای بازه مطالعاتی موردنظر نشان می‌دهد. در شکل (۴) به وضوح مشخص است که TRMM مقدار بارش را به طور قابل توجهی پایین تر تخمین می‌زند، اما با توجه به سری زمانی سالانه بارش، روند کاهشی یا افزایشی را عموماً به صورت مناسبی برآورد می‌کند. لازم به ذکر است در نیمه ابتدایی بازه زمانی مورد مطالعه روندهای معکوس و گاهی نامنظم مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از دلایل یا ترکیبی از عوامل مختلف باشد. به طور مثال، تغییرات در کاربری زمین مانند جنگل زدایی یا افزایش شهرنشینی، تغییرات در پوشش ابر یا نوسانات ناگهانی در الگوهای گردش عمومی جو می‌تواند بر دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای اثرگذار باشد. از طرفی الگوریتم‌های پردازش داده‌های ماهواره‌ای به طور مداوم به روز می‌شوند و بهبود می‌یابند. بنابراین، نتایج تخمین بارش توسط ماهواره می‌تواند دست‌خوش تغییر شود. به علاوه، عواملی مثل حساسیت الگوریتم بارش TRMM به ابرهای کم‌بارش و پربارش و تأثیر افزایش نرخ بارش به مقیاس زمانی مؤثر می‌تواند بر داده‌های تخمینی اثر بگذارد (Mohd Zad *et al.*, 2018). Hajimir Rahimi and Feizizade (2007) نشان دادند که داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های باران‌سنجی زمینی همخوانی خوبی دارند. با این حال، داده‌های ماهواره‌ای TRMM، با وجود تطابق نسبی، نمی‌تواند جایگزین کاملی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی باشد. همچنین Javanmard *et al.* (2010) به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها نشان دادند که در ایران، داده‌های ماهواره‌ای TRMM در بسیاری از مناطق، به ویژه مناطق داخلی و کوهستانی، با داده‌های زمینی همخوانی خوبی دارد، اما این داده‌ها در برخی مناطق، مقدار بارش را کمتر از واقعیت نشان می‌دهند، که با پژوهش حاضر هم‌راستا است. همین‌طور که در شکل (۳) مشخص است، می‌توان نتیجه گرفت ماهواره TRMM قادر است به صورت کلی روند بارش سالانه در منطقه مورد مطالعه را به خوبی تخمین بزند. به علاوه، با توجه به نتایج شکل (۳) بیش‌ترین و کم‌ترین بارش سالانه به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ بوده که برابر ۳۵۵ و ۱۱۵ میلی‌متر در سال می‌باشد و میزان تخمین ماهواره TRMM از بارش سالانه در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ به ترتیب برابر ۱۵۸ و ۷۶ میلی‌متر در سال است.

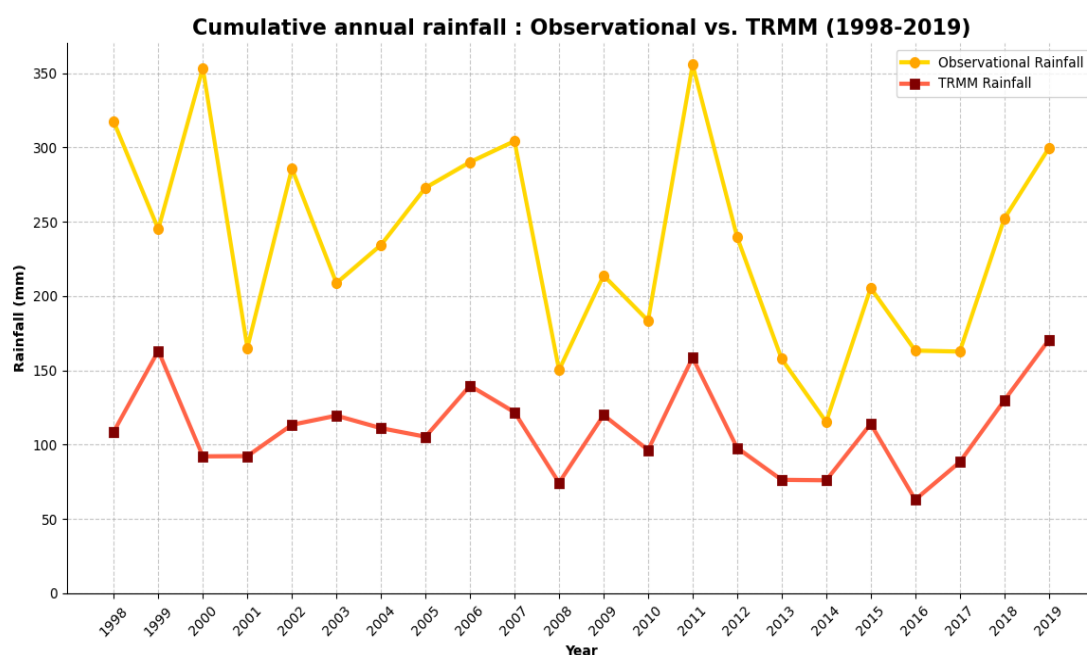


Figure 3. Cumulative annual rainfall of observations and TRMM satellite from 1998 to 2019

پس از توسعه روش بوت استرپ، تفاوت‌های معنی‌دار بین داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای مشخص شد تا تحلیل و ارزیابی دقیق‌تر داده‌ها امکان‌پذیر شود. نتایج نشان داد که اختلاف متوسط حدود ۱۰/۳۸ واحد می‌باشد. به این معنی که داده‌های بارش مشاهداتی، در میانگین حدود ۱۰/۳۸ واحد بیش‌تر از داده‌های بارش ماهواره TRMM می‌باشند. این نتیجه نشان می‌دهد که برای بیش‌تر ماه‌ها، بارش مشاهده‌ای به‌طور متوسط بیش‌تر از آنچه که داده‌های TRMM می‌باشد (شکل ۵). همچنین با توجه به شکل (۵) مشهود است که با اطمینان حدود ۹۵ درصد، اختلاف میانگین میان دو مجموعه داده بارش زمینی و ماهواره‌ای در بازه مشخص شده قرار دارد (۷/۳۳-۱۳/۳۶).

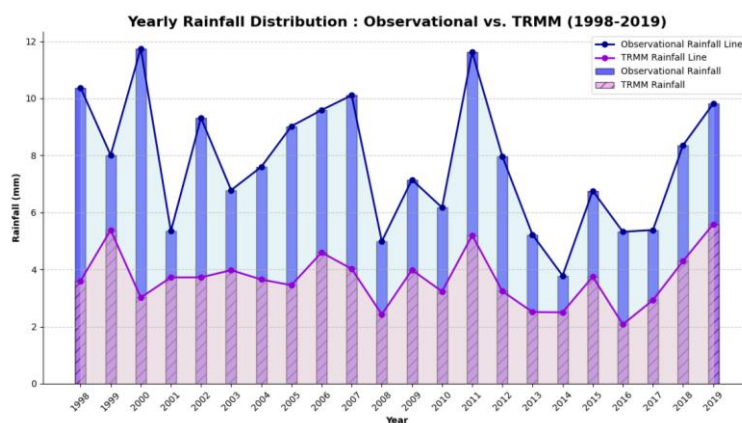


Figure 4. Comparison of annual rainfall distributions from observational and TRMM data in 1988-2019

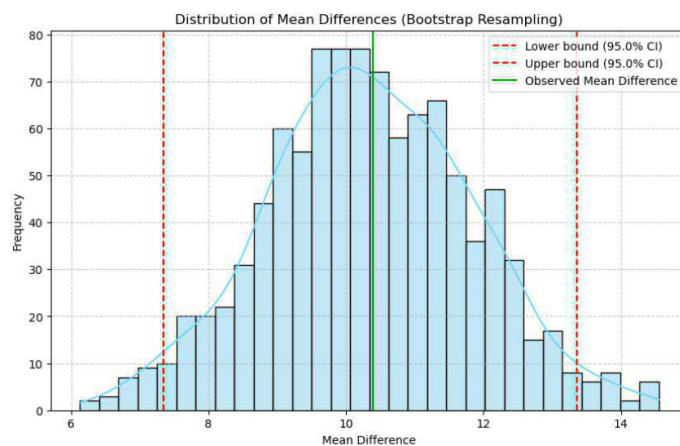


Figure 5. The mean difference between satellite and observational precipitation

به این ترتیب، اختلاف متوسط بارش مشاهداتی حداقل ۷/۳۳ واحد و حداکثر ۱۳/۳۶ واحد بیش‌تر از ماهواره TRMM است. به‌طور خلاصه، این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که اختلاف بین دو مجموعه داده معنی‌دار بوده و داده‌های بارش مشاهداتی به‌طور میانگین مقادیر بیش‌تری را نسبت به داده‌های بارش ماهواره‌ای TRMM نشان می‌دهد. نتایج روش بوت‌استرپ، نقاط ضعف داده‌های ماهواره‌ای TRMM را نشان داده و به تحلیل دقیق‌تر نتایج برآورد خشک‌سالی توسط این داده‌ها کمک می‌کند. در واقع با دانستن بازه تغییرات ارائه‌شده، عدم قطعیت استفاده از داده‌های بارش در منطقه مورد مطالعه تفسیر می‌گردد. این بازه (۷/۳۳-۱۳/۳۶) بیان می‌کند در بازه‌ای با اطمینان‌پذیری بالا (۹۵ درصد)، تا چه حد

می‌توان به داده‌های TRMM برای بررسی‌هایی مانند تخمین خشک‌سالی، بیلان آب و اجرای پروژه‌های کنترل سیل در مناطق فاقد ایستگاه‌های سینوپتیک تکیه کرد.

پس از تخمین بارش ماهواره‌ای، مقدار شاخص خشک‌سالی SPI در مقیاس سه، شش و ۱۲ ماهه برای بازه مطالعاتی ۱۹۹۸-۲۰۱۹ محاسبه گردید. هم‌چنین مقدار شاخص SPI برای بارش مشاهداتی به منظور بررسی عملکرد تولیدات بارش ماهواره TRMM در مقیاس‌های مذکور برآورد شد. نتایج حاصل در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

در شکل (۶) مقادیر SPI محاسبه‌شده براساس داده‌های بارش مشاهداتی ایستگاه نشان داده شده است. براساس این جدول شهر تهران طبق مقادیر SPI سه‌ماهه در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۴، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ با مقادیری نزدیک به ۲- شرایط خشک‌سالی شدیدی را تجربه کرده است.

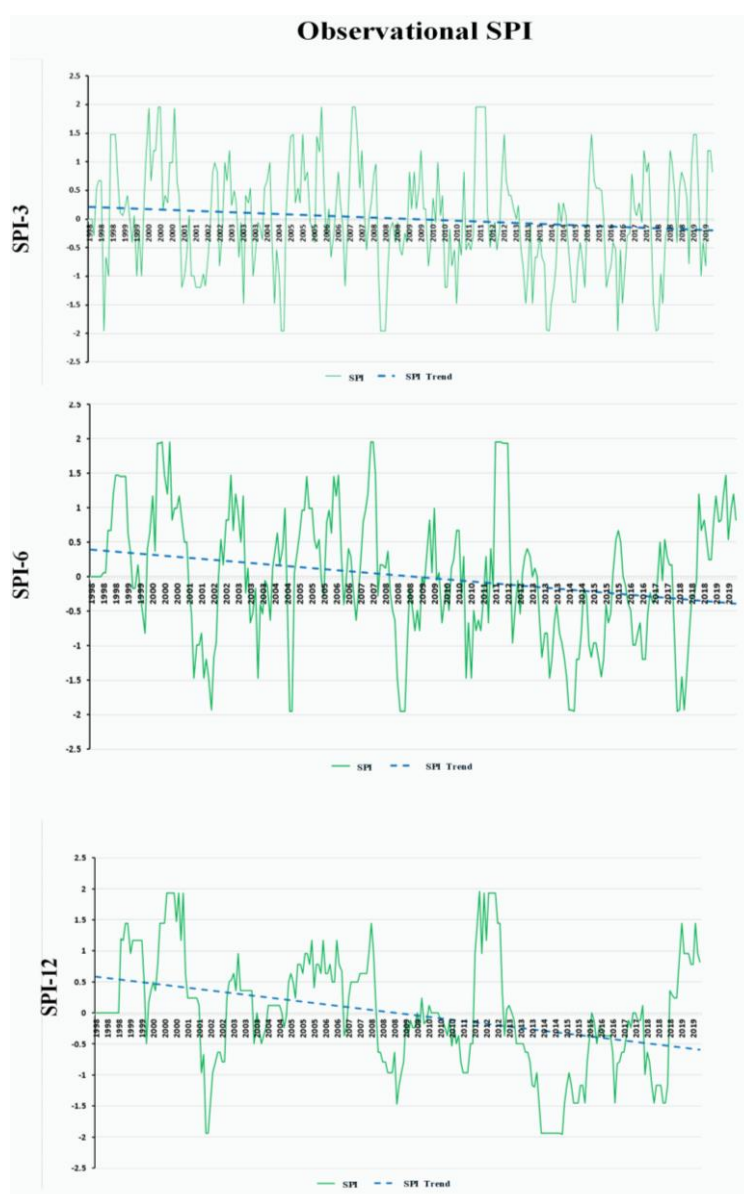


Figure 6. SPI index based on observational data in the period (1998-2019)

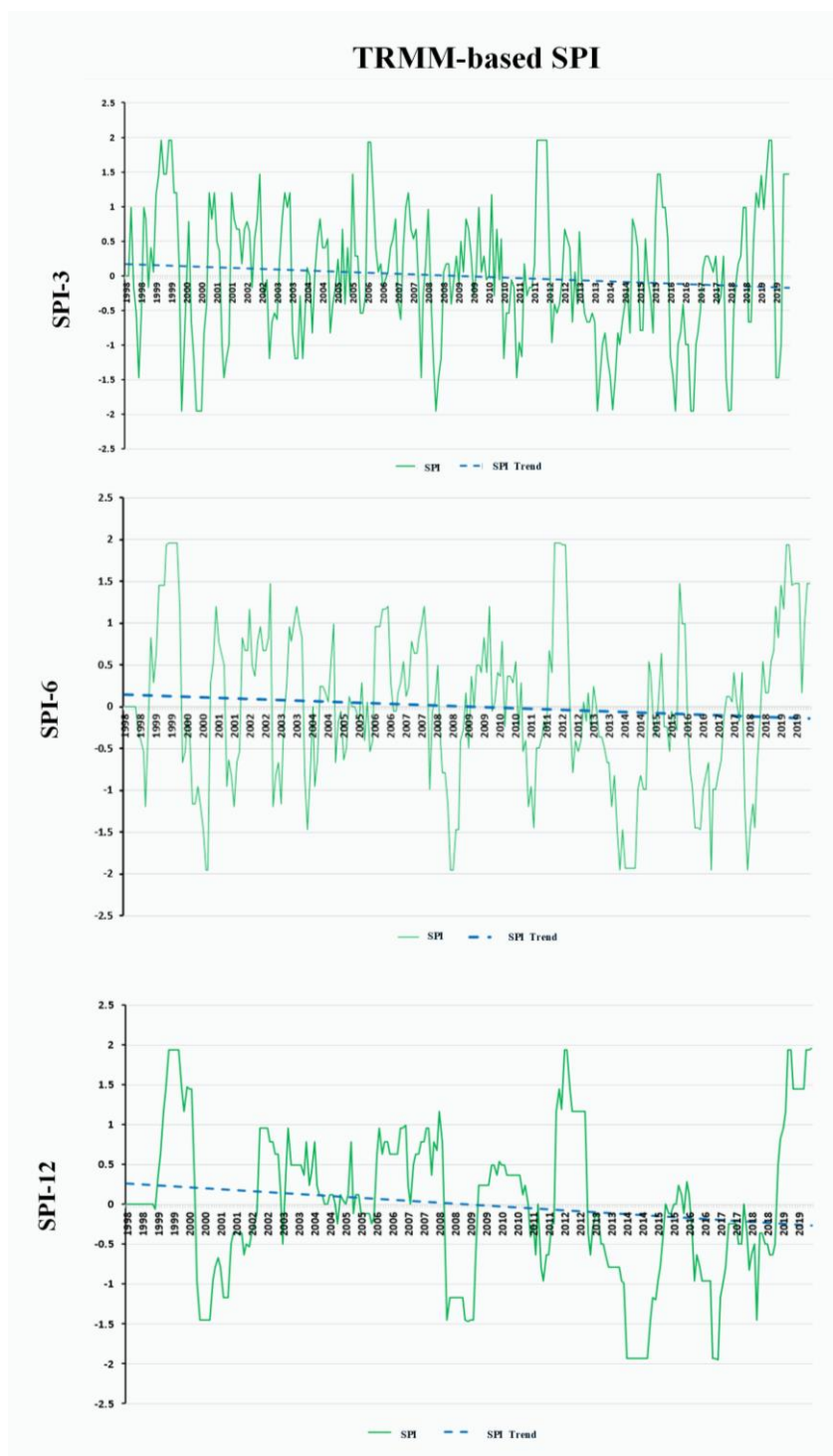


Figure 7. SPI index based on TRMM data in the period (1998-2019)

هم‌چنین با توجه به مقادیر SPI در مقیاس شش‌ماهه، منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ شهر تهران خشک‌سالی شدیدی را با شاخص حدوداً -2 را تجربه کرده است. به‌علاوه با توجه به مقادیر شاخص

SPI در مقیاس ۱۲ ماهه، خشک‌سالی شدید در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۴ رخ داده است. در شکل (۷) مقادیر شاخص SPI براساس تولیدات بارش TRMM ارائه شده است. در همین راستا، نتایج SPI سه‌ماهه نشان می‌دهد که منطقه در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ خشک‌سالی شدید با SPI نزدیک به -۲ را تجربه کرده است. به علاوه، نتایج نشان می‌دهد، با وجود این که تولیدات ماهواره‌ای بارش TRMM در منطقه مورد مطالعه دارای دقت بالایی نیستند، اما می‌توانند سال‌های با خشک‌سالی شدید را به‌طور قابل‌قبولی تخمین بزنند. همچنین براساس نتایج خشک‌سالی در مقیاس شش‌ماهه براساس داده‌های بارش TRMM مشاهده می‌شود که در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۴، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ خشک‌سالی شدید با مقدار SPI نزدیک به -۲ رخ داده است. این امر نشان می‌دهد که خشک‌سالی تخمین زده‌شده در مقیاس شش‌ماهه نیز قادر است شدت و زمان خشک‌سالی شدید را به‌طور قابل‌قبولی تخمین بزند. همچنین براساس شکل (۷) در مقیاس ۱۲ ماهه، خشک‌سالی شدید در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ رخ داده است. با مقایسه شکل‌های (۶) و (۷) به‌طور کلی، می‌توان گفت که داده‌های TRMM به‌طور قابل‌قبولی قادر به شناسایی سال‌های خشک‌سالی شدید هستند، اما دقت این داده‌ها به اندازه داده‌های مشاهداتی نیست. این می‌تواند به دلیل محدودیت‌های ذاتی داده‌های TRMM باشد. به عبارت دیگر، از آنجاکه داده‌های مشاهداتی به‌طور مداوم و مستقیم از شرایط واقعی محیطی به دست می‌آیند و محدودیت‌های ماهواره‌ای را ندارند، دقیق‌تر هستند.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد تولیدات بارش TRMM در برآورد بارش و شاخص خشک‌سالی SPI از دو معیار خطای RMSE و NS استفاده شده است. نتایج این بررسی در جدول (۳) نشان داده شده است. براساس یافته‌ها، ماهواره TRMM می‌تواند خشک‌سالی در مقیاس شش‌ماهه را به‌صورت بهتری نسبت به خشک‌سالی سه و ۱۲ ماهه تخمین بزند. با توجه به جدول (۳) مشهود است که برای شاخص SPI سه‌ماهه، داده‌های TRMM عملکرد ضعیفی را از خود نشان می‌دهند، به‌طوری‌که مقدار خطای NS برابر با $-21/92$ و RMSE برابر با $135/70$ است که نشان‌دهنده اختلاف قابل‌توجهی بین تخمین‌های ماهواره‌ای و مقادیر خشک‌سالی مشاهده شده است. در پیرو این نتایج، مقادیر RMSE و NS برای شاخص SPI شش‌ماهه بهبود می‌یابد به‌طوری‌که NS برابر با $0/28$ و RMSE برابر با $0/873$ می‌رسد. همچنین SPI ۱۲ ماهه مقدار NS برابر با $-0/17$ و مقدار RMSE برابر با $0/949$ است که در مقایسه با SPI سه‌ماهه بهتر و در مقایسه با SPI شش‌ماهه ضعیف‌تر است. همچنین برآورد بارش ماهانه ماهواره TRMM با مقدار NS برابر با $0/173$ و RMSE برابر با $0/960$ عملکرد قابل‌قبولی دارد. مثبت‌بودن مقدار NS در برآورد بارش ماهانه نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی بهتر در مقایسه با مقادیر SPI سه، شش و ۱۲ ماهه است. به عبارت دیگر، مقادیر بارش تخمین زده‌شده توسط ماهواره TRMM با توجه به جدول (۳) قابل‌قبول است. بنابراین، می‌توان گفت داده‌های TRMM می‌توانند بینشی در مورد الگوهای بارش ارائه دهند، اما قابلیت آن‌ها در برآورد مقادیر SPI، به‌ویژه در بازه کوتاه سه‌ماهه، محدود بوده و با خطای بیش‌تری روبه‌رو است.

Table 3. Performance of TRMM satellite precipitation products in estimating precipitation and SPI index

	SPI-3	SPI-6	SPI-12	Monthly rainfall
NS	-21.92	0.028	-0.017	0.173
RMSE	135.70	0.873	0.949	0.960

جالب توجه است که براساس شکل (۶)، مقادیر شاخص SPI نزولی بوده و این امر در SPI تخمین زده شده براساس داده‌های بارش TRMM نیز صدق می‌کند (شکل ۷). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های بارش TRMM می‌توانند روند کلی خشک‌سالی را به‌خوبی برآورد کنند، اگرچه در پیش‌بینی دقیق مقادیر عددی شاخص‌های SPI محدودیت‌هایی دارند.

پس از برآورد میزان خطای تخمین خشک‌سالی توسط محصولات سنجش از دور، به‌منظور تحلیل عمیق‌تر رابطه بین SPI مشاهداتی و زمینی از روش‌های آماری مختلفی استفاده گردید. نتایج نشان داده شده در شکل (۸) مبین آن است که همبستگی میان دو پارامتر مذکور با افزایش مقیاس زمانی تخمین خشک‌سالی افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان اعتماد بیش‌تری به نتایج تخمین خشک‌سالی در مقیاس‌های بالاتر مانند ۱۲ ماهه در مقایسه با سه و شش‌ماهه با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM داشت. همچنین آزمون همبستگی کندال در مقایسه با سه آزمون دیگر میزان همبستگی کم‌تری را برآورده کرده است. این روش براساس تطابق رتبه‌های داده‌ها بین دو متغیر است و برای مواردی که توزیع داده‌ها ناهمبسته است و یا رابطه خطی بین متغیرها وجود ندارد مناسب است. همبستگی کم‌تر در روش آزمون کندال ممکن است به دلیل عدم تطابق کامل رتبه‌های دو متغیر باشد. به عبارت دیگر، اگر دو متغیر رتبه‌های مشابهی نداشته باشند، همبستگی آزمون کندال کم‌تر از روش‌های دیگر مانند همبستگی پیرسن خواهد بود.

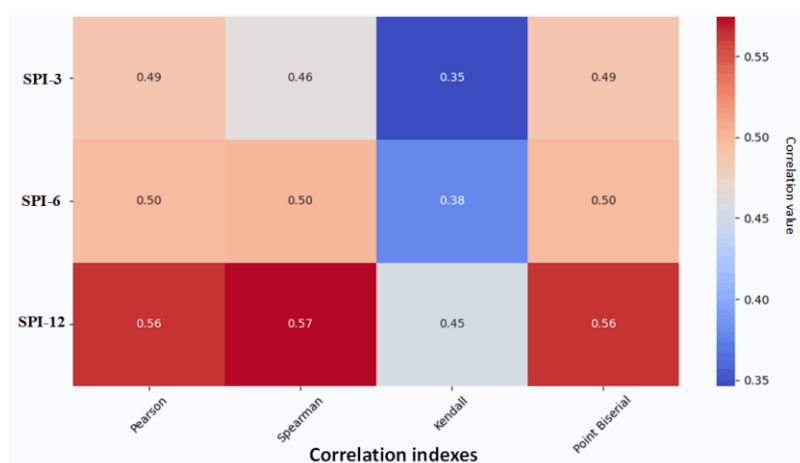


Figure 8. Correlation between realized drought based on remote sensing and terrestrial drought

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر از تولیدات سنجش از دور به‌منظور تخمین بارش و خشک‌سالی تهران استفاده گردید. به همین منظور پس از استخراج بارش ماهواره TRMM با استفاده از Google Earth Engine، شاخص SPI تخمین زده‌شده و با مقادیر SPI محاسبه‌شده براساس داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. سپس از دو معیار RMSE و NS استفاده شد که کمک شایانی به شناسایی دقت برآورد SPI توسط داده‌های ماهواره TRMM کرد. در مرحله بعد، به‌منظور بررسی تفاوت‌ها بین بارش زمینی و محصولات بارش TRMM از روش بوت‌استرپ استفاده شد و تفاوت معنی‌دار بین این دو سری داده مشخص شد. با استفاده از روش بوت‌استرپ، این مقاله توانسته است دامنه اطمینان ۹۵ درصد برای اختلاف میانگین بین دو مجموعه داده را تعیین کند. این دامنه اطمینان به ما این امکان را داد که با روش آماری معتبری، اندازه و معنی‌داری اختلاف‌های مشاهده‌شده را ارزیابی کنیم و نتایج به‌دست‌آمده را با اطمینان بیش‌تری تفسیر نماییم. از طرفی دیگر از روش‌های دقیق آماری برای برآورد همبستگی بین خشک‌سالی مبتنی بر داده‌های زمینی و ماهواره‌ای استفاده گردید، تا دقت و اعتبار برآوردهای خشک‌سالی به‌دست‌آمده از داده‌های TRMM ارزیابی و مشخص گردد که این داده‌ها تا چه اندازه با داده‌های مشاهداتی هماهنگی دارند. این تحلیل‌ها به شناسایی تفاوت‌های موجود و درک بهتر از نقاط قوت و ضعف داده‌های ماهواره‌ای در برآورد خشک‌سالی کمک می‌کند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که در همه ماه‌های سال، بارش مشاهده‌ای به‌طور متوسط از آنچه که داده‌های بارش تخمینی TRMM

نشان می‌دهد بیش‌تر است. به‌علاوه، مقدار خطای RMSE و NS در برآورد بارش به‌ترتیب برابر ۰/۹۶۰ و ۰/۱۷۳ می‌باشد. این موضوع بیانگر این مهم است که داده‌های TRMM به‌طور نسبتاً قابل‌قبولی روند بارش را برآورد می‌کنند، اگرچه در برآورد دقیق SPI محدودیت‌هایی دارند. همچنین نتایج نشان داد با افزایش مقیاس زمانی تخمین خشک‌سالی هواشناسی، اطمینان‌پذیری نسبت به داده‌های ماهواره‌ای بالاتر می‌باشد. یافته‌های پژوهش حاضر بیانگر خطای قابل‌قبول تخمین SPI در مقیاس شش ماهه بود، اما براساس نتایج، تخمین خشک‌سالی سه‌ماهه با خطای بالایی همراه بود. به همین منظور پیشنهاد می‌شود از داده‌های بارش TRMM به‌منظور شناسایی شدت و مدت خشک‌سالی در مقیاس سه‌ماهه استفاده نگردد. با تحلیل مشترک نتایج روش بوت استرپ و مقادیر RMSE و NS مشخص شد که تفاوت‌های معنادار بین داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای TRMM می‌تواند دلیل اصلی عدم دقت در تخمین SPI توسط داده‌های TRMM باشد. با این وجود، نتایج نشان داد که داده‌های TRMM می‌توانند دید مناسبی در برآورد روند کلی خشک‌سالی‌ها ارائه دهند. به‌عبارت دیگر، نتایج برآورد خشک‌سالی از طریق داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای TRMM، روندی صعودی در شدت و مدت خشک‌سالی‌ها نشان دادند. در همین راستا احتمال می‌رود روند صعودی خشک‌سالی‌ها در آینده ادامه داشته و حتی می‌تواند بر شدت و مدت آن‌ها افزوده شود و خطرات قابل‌توجهی برای کلان‌شهر تهران به‌وجود آورد. نتایج این مقاله می‌تواند برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع آب در تهران، به‌ویژه در مواجهه با چالش تغییرات اقلیمی و نیاز روزافزون به آب در این کلان‌شهر مفید باشد. همچنین داده‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌تواند بینشی از روند نگران‌کننده خشک‌سالی در شهر تهران به سیاست‌گذاران محیط‌زیستی ارائه دهد تا برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی و آب را به‌گونه‌ای طراحی کنند که با تغییرات اقلیمی سازگار بوده و خسارت‌های حداقلی به کشاورزان و شهروندان این منطقه وارد آید و تأثیرات منفی خشک‌سالی بر زیرساخت‌های شهری را کاهش دهد. همچنین، توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌های مختلف، محدودیت‌های موجود در داده‌های TRMM پوشش داده شود. به‌علاوه، پیشنهاد می‌شود از داده‌های بارش سنجش از دور و تلفیق آن با روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی عمیق به‌منظور پیش‌بینی خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه استفاده شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Tropical Rainfall Measuring Mission
2. Standardized Precipitation Index
3. Bootstrap
4. Root Mean Squared Error
5. Nash–Sutcliffe
6. Spearman correlation
7. Kendall correlation
8. Point-biserial correlation
9. Pearson correlation
10. Normalized Difference Vegetation Index
11. Palmer Drought Severity Index
12. Land Surface Temperature
13. Gamma Distribution
14. Two-parameter Gamma distribution
15. TRMM Microwave Imager
16. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources
17. Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM
18. Climate Hazards Infrared Precipitation with Station data
19. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. مراجع

- Abdi, H. (2007). The Kendall rank correlation coefficient. *Encyclopedia of measurement and statistics*, 2, 508-510.
- Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (Eds.). (1968). Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables (Vol. 55). US Government printing office.
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlow, B.D. and Hain, C.R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), pp.452-480.
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A., & Magliocca, N. (2019). Future drought risk in Africa: Integrating vulnerability, climate change, and population growth. *Science of the Total Environment*, 662, 672-686
- Ahmad, M. M., Yaseen, M., & Saqib, S. E. (2022). Climate change impacts of drought on the livelihood of dryland smallholders: Implications of adaptation challenges. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 80, 103210.
- Al-Kilani, M. R., Rahbeh, M., Al-Bakri, J., Tadesse, T., & Knutson, C. (2021). Evaluation of remotely sensed precipitation estimates from the NASA POWER project for drought detection over Jordan. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 561-573.
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Mozaffari, E., Azhdari, Z., & Shekari, M. (2023). Trivariate risk analysis of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135(6), 52.
- Bodghjamali, J., Javanmard, S., & Tajbakhsh, S. (2020). The estimation of type and amount rainfall using TMI Sensor of TRMM Satellite. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 38-56.
- Danandeh Mehr, A., Rikhtehgar Ghiasi, A., Yaseen, Z. M., Sorman, A. U., & Abualigah, L. (2023). A novel intelligent deep learning predictive model for meteorological drought forecasting. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(8), 10441-10455.
- de Brito, C.S., da Silva, R.M., Santos, C.A.G., Neto, R.M.B., & Coelho, V.H.R., 2021. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. *Atmospheric Research*, 250, p.105380.
- Dejene, I. N., Wedajo, G. K., Bayissa, Y. A., Abraham, A. M., & Cherinet, K. G. (2023). Satellite rainfall performance evaluation and application to monitor meteorological drought: a case of Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Natural Hazards*, 119(1), 167-201.
- Easterling, D. R. (2012). Global data sets for analysis of climate extremes. In *Extremes in a changing climate: detection, analysis and uncertainty* (pp. 347-361). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Edwards, D. C., & McKee, T. B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales.
- Efron, B. (1992). Bootstrap methods: another look at the jackknife. In *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution* (pp. 569-593). New York, NY: Springer New York.
- Fahimi Nezhad, E., Fallah Ghalhari, G., & Bayatani, F. (2019). Forecasting maximum seasonal temperature using artificial neural networks "Tehran case study". *Asia-pacific journal of atmospheric sciences*, 55, 145-153.
- Farahani, H., & Jahansoozi, M. (2022). Analysis of rural households' resilience to drought in Iran, case study: Bajestan County. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 82, 103331.
- Farahmand, A., & AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*, 76, 140-145.
- Fathian, F., Dehghan, Z., Alee, M. M., Vaheddoost, B., Abualigah, L., & Danandeh Mehr, A. (2024). Regional classification of extreme droughts across Iran. *Acta Geophysica*, 72(5), 3485-3509.
- Ghozat, A., Sharafati, A., & Hosseini, S. A. (2022). Satellite-based monitoring of meteorological drought over different regions of Iran: application of the CHIRPS precipitation product. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 36115-36132.

- Gringorten, I. I. (1963). A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysical Research*, 68(3), 813-814.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.
- Habibi, S. M., & Hourcade, B. (2005). Atlas of Tehran metropolis. *Tehran: Urban Processing and Planning Co, 1*.
- Hagman, G., Beer, H., Bendz, M., & Wijkman, A. (1984). Prevention better than cure. Report on human and environmental disasters in the Third World. 2.
- Hajimir Rahimi, M., & Feizizade, B. (2007). Validation of TRMM Precipitation and Ground-Based Radar in estimation of precipitation, National Geomatics Conference 86 (GEO86), National Cartographic Center, Tehran, Iran. (In Persian).
- Halwatura, D., McIntyre, N., Lechner, A. M., & Arnold, S. (2017). Capability of meteorological drought indices for detecting soil moisture droughts. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 396-412.
- Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87-93.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488.
- Hu, Y. M., Liang, Z. M., Liu, Y. W., Wang, J., Yao, L., & Ning, Y. (2015). Uncertainty analysis of SPI calculation and drought assessment based on the application of Bootstrap. *International Journal of Climatology*, 35(8).
- Jain, S. K., & Sudheer, K. P. (2008). Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash–Sutcliffe index. *Journal of hydrologic engineering*, 13(10), 981-986.
- Javanmard, S., Yatagai, A., Nodzu, M. I., BodaghJamali, J., & Kawamoto, H. (2010). Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran. *Advances in Geosciences*, 25, 119-125.
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote sensing of Environment*, 87(1), 85-98.
- Kareem, S., Hamad, Z. J., & Askar, S. (2021). An evaluation of CNN and ANN in prediction weather forecasting: A review. *Sustainable Engineering and Innovation*, 3(2), 148-159.
- Katipoğlu, O. M., Acar, R., & Şengül, S. (2020). Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: a case study from Euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*, 11(S1), 29-43.
- Khadr, M., Morgenschweis, G., & Schlenkhoff, A. (2009). Analysis of meteorological drought in the Ruhr basin by using the standardized precipitation index. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 3(9), 291-300.
- Khanmohammadi, N., Rezaie, H., & Behmanesh, J. (2022). Investigation of drought trend on the basis of the best obtained drought index. *Water Resources Management*, 36(4), 1355-1375.
- Kornbrot, D. (2014). Point biserial correlation. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*.
- Li, X., Tao, R., & Zhang, K. (2022). Drought Monitoring Based on Remote Sensing. *Remote Sensing of Water-Related Hazards*, 149-168.
- Liu, Y. W., Wang, W., Hu, Y. M., & Liang, Z. M. (2014). Drought assessment and uncertainty analysis for Dapoling basin. *Natural hazards*, 74, 1613-1627.
- Logan, K. E., Brunsell, N. A., Jones, A. R., & Feddema, J. J. (2010). Assessing spatiotemporal variability of drought in the US central plains. *Journal of Arid Environments*, 74(2), 247-255.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995, January). Drought monitoring with multiple time scales. Proceedings of the Conference on Applied Climatology.
- Meteorological Organization of Tehran Province. (2018). Detailed report on the rainfall situation in Tehran province during the last five years (2009-2013), 47 pages. (In Persian)
- Mianabadi, A., Salari, K., & Pourmohamad, Y. (2022). Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12(8), 183.

- Mishra, A., Singh, V., & Desai, V. (2009). Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(1), 41-55.
- Mohd Zad, S. N., Zulkafli, Z., & Muharram, F. M. (2018). Satellite rainfall (TRMM 3B42-V7) performance assessment and adjustment over Pahang River Basin, Malaysia. *Remote sensing*, 10(3), 388.
- Mokhtar, A., Jalali, M., He, H., Al-Ansari, N., Elbeltagi, A., Alsafadi, K., Abdo, H.G., Sammen, S.S., Gyasi-Agyei, Y., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Estimation of SPEI meteorological drought using machine learning algorithms. *IEEE Access*, 9, 65503-65523.
- Naresh Kumar, M., Murthy, C. S., Sessa Sai, M. V. R., & Roy, P. S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 16(3), 381-389.
- Pande, C. B., Costache, R., Sammen, S. S., Noor, R., & Elbeltagi, A. (2023). Combination of data-driven models and best subset regression for predicting the standardized precipitation index (SPI) at the Upper Godavari Basin in India. *Theoretical and Applied Climatology*, 152(1), 535-558.
- Pandey, V., Srivastava, P. K., Mall, R. K., Munoz-Arriola, F., & Han, D. (2022). Multi-satellite precipitation products for meteorological drought assessment and forecasting in Central India. *Geocarto International*, 37(7), 1899-1918.
- Pazhanivelan, S., Geethalakshmi, V., Samykanu, V., Kumaraperumal, R., Kancheti, M., Kaliaperumal, R., ... & Yadav, M. K. (2023). Evaluation of SPI and rainfall departure based on multi-satellite precipitation products for meteorological drought monitoring in Tamil Nadu. *Water*, 15(7), 1435.
- Pourzand, F., & Noy, I. (2022). Catastrophic droughts and their economic consequences. In *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*.
- Quiring, S. M. (2009). Developing objective operational definitions for monitoring drought. 425 *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48 (6), 1217-1229.
- Ragab, R., & Prudhomme, C. (2002). Sw-soil and Water: climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: prospective and challenges for the 21st century. *Biosystems engineering*, 81(1), pp.3-34.
- Rahman, K. U., Hussain, A., Ejaz, N., Shang, S., Balkhair, K. S., Khan, K. U. J., ... & Rehman, N. U. (2023). Analysis of production and economic losses of cash crops under variable drought: A case study from Punjab province of Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 85, 103507.
- Razmi, R., Sotoudeh, F., Ghane, M., & Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Temporal-spatial analysis of drought and wet periods: case study of a wet region in Northwestern Iran (East Azerbaijan, West Azerbaijan, Ardebil and Zanjan provinces). *Applied Water Science*, 12(11), 251.
- Sakellariou, S., Spiliotopoulos, M., Alpanakis, N., Faraslis, I., Sidiropoulos, P., Tziatzios, G. A., ... & Dercas, N. (2024). Spatiotemporal Drought Assessment Based on Gridded Standardized Precipitation Index (SPI) in Vulnerable Agroecosystems. *Sustainability*, 16(3), 1240.
- Santos, J.F., Pulido-Calvo, I., & Portela, M.M. (2010). Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. *Water Resources Research*, 46(3).
- Savari, M., Damaneh, H. E., & Damaneh, H. E. (2023). Effective factors to increase rural households' resilience under drought conditions in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90, 103644.
- Sharafi, S., Ghaleni, M. M., & Sadeghi, S. (2022). Spatial and temporal analysis of drought in various climates across Iran using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14), 1279.
- Sheffield, J., Wood, E.F., & Roderick, M.L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), 435-438.
- Shirmohammadi, B., Moradi, H., Moosavi, V., Semiromi, M. T., & Zeinali, A. (2013). Forecasting of meteorological drought using Wavelet-ANFIS hybrid model for different time steps (case study: southeastern part of east Azerbaijan province, Iran). *Natural hazards*, 69, 389-402.
- Steinmann, A. C., & Cavalcanti, L. F. (2006). Developing multiple indicators and triggers for drought plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 164-174.
- Suliman, A.H.A., Awchi, T.A., Al-Mola, M., & Shahid, S. (2020). Evaluation of remotely sensed precipitation sources for drought assessment in Semi-Arid Iraq. *Atmospheric Research*, 242, 105007.
- 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*, 17(22), 179-183.

- Thenkabail, P. S., & Gamage, M. S. D. N. (2004). *The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia*, (Vol. 85). Iwmi.
- Tssemelis, D. E., Vasilakou, C. G., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Alexandris, S. G., Zervas, E., ... & Karavitis, C. A. (2022). Drought assessment using the standardized precipitation index (SPI) in GIS environment in Greece. In *Computers in earth and environmental sciences* (pp. 619-633). Elsevier.
- Vergni, L., Di Lena, B., Todisco, F., & Mannocchi, F. (2017). Uncertainty in drought monitoring by the Standardized Precipitation Index: the case study of the Abruzzo region (central Italy). *Theoretical and applied climatology*, 128, 13-26.
- Wang, L., Zhang, Y., Chen, X., Liu, Y., Wang, S., & Wang, L. (2024). Ensemble learning based on remote sensing data for monitoring agricultural drought in major winter wheat-producing areas of China. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 48(2), 171-190.
- Ward, E., Buytaert, W., Peaver, L., & Wheater, H. (2011). Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective. *Advances in water resources*, 34(10), 1222-1231.
- Wilhite, D.A., & Glantz, M.H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120.