

## Evaluation of the efficiency of meteorological drought indices in rangeland and rainfed lands of Tehran province using remote sensing indicators

Ali Akbar Damavandi<sup>1\*</sup> 

1\*- Corresponding author, Assistant Professor, Agricultural Education and Extension Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: [damavandi58@gmail.com](mailto:damavandi58@gmail.com)

Received: 05/30/2024

Revised: 08/09/2025

Accepted: 09/04/2025

Published: 10/06/2025

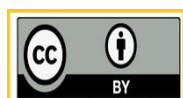
### Abstract

#### Background and Objective

Drought assessment is crucial for the effective management of water resources and agricultural products, aiming to develop strategies to reduce the loss of these vital resources. Drought assessment indicators are essential tools for evaluating this process, and selecting the appropriate indicator is indispensable for accurate drought assessment. Indicators are quantitative measures that can be used to determine the severity and extent of droughts numerically. According to existing literature, the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) are the most common and widely used drought assessment indicators. Therefore, comparing these two indices is very important to understand their differences and distinctions. On the other hand, one of the limitations of station-based indices is their inadequate spatial coverage. In contrast, satellite-based indices eliminate the limitations of point-based methods. For this purpose, satellite-based drought indices such as NDVI and VHI were developed. The objective of this research is to compare the effectiveness of SPI and SPEI indices in drought assessment based on remote sensing data in areas with natural vegetation and rainfed agriculture. Eliminating the impact of stations located in irrigated agriculture areas in southern Tehran province and its impact on the results of drought indicators is one of the innovations of this research.

#### Methodology

Tehran province is characterized by diverse topography, varying climatic conditions, and different land uses. The northern and eastern parts of the province feature natural grasslands, while the southern region is used mainly for irrigated agriculture. In this study, meteorological drought indices, SPI and SPEI, were calculated based on precipitation and evapotranspiration data from 31 meteorological stations over a twenty-year period from 2000 to 2019. The choice of this timeframe was due to data availability constraints for precipitation, evapotranspiration, and the MODIS sensor data, which have been accessible since 2000. The relationship between these two indices was generally examined, with a focus on the Southern stations (due to errors caused by irrigation practices affecting vegetation coverage during drought periods). A three-month period ending in June was considered for both indices. To evaluate the accuracy and performance of the SPI and SPEI indices, the Vegetation Health Index (VHI), a satellite-based drought index, was extracted using MODIS products at the station locations and calculated from NDVI and LST values.



**Results**

The results indicated a stronger statistical correlation between SPI and SPEI after excluding the stations in southern Tehran (where irrigated agriculture is dominant), with the coefficient of determination increasing from 0.65 to 0.86. This suggests that land use significantly influences evapotranspiration values in southern stations, thereby affecting the accuracy of the SPEI index. Overall, SPI showed a higher correlation with remote sensing drought indicators such as NDVI, VCI, TCI, and VHI. After removing stations in Parndak, Baqerabad, Javadabad, Golkhandan, Ghanjabad, and Hamamk, the relationships between SPI and SPEI and the remote sensing drought indicators were re-evaluated, revealing an increase in model accuracy (coefficients of determination from 0.40 to 0.55 for SPI and from 0.33 to 0.54 for SPEI). The comparison of SPI and SPEI further demonstrated the superior performance of SPEI in areas with dry farming practices.

**Conclusion**

Results of this study indicated that considering land use types and cultivation methods is essential for improving the effectiveness of SPI and SPEI. Results suggest that SPEI is more effective where higher evapotranspiration occurs, whereas land use diversity reduces the accuracy of relationships between meteorological and satellite-based drought indicators. Developing tailored indices for each land use type could be a promising approach for future research.

**Keywords:** Drought, drought indices, SPEI, remote sensing, VHI.

## بررسی کارایی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در اراضی مرتعی و دیم استان تهران به کمک شاخص‌های سنجش‌ازدوری

علی اکبر دماوندی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، استادیار، مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست الکترونیکی: ra\_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰

### چکیده

#### سابقه و هدف

ارزیابی خشک‌سالی برای مدیریت مؤثر منابع آب و محصولات کشاورزی، به‌منظور توسعه راهبردهای کاهش هدررفت این منابع بسیار حیاتی است. شاخص‌های ارزیابی خشک‌سالی به‌عنوان ابزاری ضروری برای ارزیابی این فرایند بوده و انتخاب شاخص مناسب ارزیابی صحیح خشک‌سالی اجتناب‌ناپذیر است. شاخص‌ها، سنجه‌های کمی هستند که با استفاده از آنها می‌توان شدت و بزرگی خشک‌سالی‌ها را به‌صورت کمی تعیین نمود. براساس منابع موجود، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش -تبخیر تعلق استاندارد شده (SPEI) رایج‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی خشک‌سالی هستند. بنابراین مقایسه این دو شاخص به‌منظور فهم و درک تفاوت‌ها و تفاوت‌هایشان بسیار ضروریست. از سویی، یکی از ضعف‌های شاخص‌های مبتنی بر ایستگاه‌های هواشناسی آن است که از پراکنش مکانی مناسبی برخوردار نیستند. در مقابل، به‌کارگیری شاخص‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، محدودیت‌های روش‌های نقطه‌ای را از بین می‌برد. برای این منظور، شاخص‌های خشک‌سالی ماهواره‌ای مانند NDVI و VHI ایجاد شدند. هدف این پژوهش، مقایسه کارایی شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی براساس شاخص‌های سنجش‌ازدوری در مناطق با رویش طبیعی و کشاورزی دیم است. حذف تأثیر ایستگاه‌های واقع در مناطق زراعت آبی در جنوب استان تهران و تأثیر آن بر نتایج شاخص‌های خشک‌سالی ازجمله نوآوری این پژوهش است.

#### مواد و روش‌ها

استان تهران یکی از استان‌های با توپوگرافی، شرایط اقلیمی متفاوت و نیز کاربری‌های مختلف است. شمال و شرق استان دارای پوشش طبیعی مرتعی و جنوب آن دارای کاربری کشاورزی آبی است. در این پژوهش شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI براساس داده‌های بارش و تبخیر دریافتی ۳۱ ایستگاه هواشناسی، برای بازه زمانی بیست‌ساله ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ محاسبه گردید. علت انتخاب این بازه زمانی، محدودیت دسترسی داده‌های بارش و تبخیر و تعلق و نیز داده‌های سنجنده مودیس است که از سال ۲۰۰۰ در دسترس بوده‌اند. رابطه میان این دو شاخص در حالت کلی و حالت حذف ایستگاه‌های جنوب استان (به دلیل خطایی که زراعت آبی در میزان پوشش گیاهی در دوره‌های خشک‌سالی ایجاد می‌کرد) مورد بررسی قرار گرفت. بازه زمانی سه‌ماهه منتهی به خردادماه برای هر دو شاخص در نظر گرفته شد. برای ارزیابی صحت، کارایی شاخص‌های SPI و SPEI، شاخص خشک‌سالی ماهواره‌ای سلامت گیاهی (VHI) به کمک محصولات سنجنده MODIS در موقعیت ایستگاه‌ها استخراج شد و از مقادیر NDVI و LST محاسبه شد.

#### نتایج

نتایج نشان دادند که رابطه آماری میان شاخص SPI و SPEI پس از حذف ایستگاه‌های جنوب استان تهران (کشاورزی آبی) قوی‌تر شده است (ضریب تبیین از ۰/۶۵ به ۰/۸۶ افزایش یافته است). بدین معنی که نوع کاربری بر مقادیر تبخیر ایستگاه‌های جنوبی استان، تحت تأثیر نوع کشاورزی آبی قرار گرفته که بر صحت داده‌های شاخص SPEI تأثیر گذاشته است. در حالت کلی، شاخص SPI دارای همبستگی بیشتری با شاخص‌های سنجش‌ازدوری پایش خشک‌سالی NDVI، VCI، TCI و VHI است. پس از حذف ایستگاه‌های پرنده، باقرآباد،

جوادآباد، گل‌خندان، غنی‌آباد و حمامک، رابطه شاخص SPI و SPEI با شاخص‌های سنجش‌ازدوری خشک‌سالی مورد بررسی دوباره قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت مدل‌ها در این حالت بیشتر شده است (ضریب تبیین از ۰/۴ به ۰/۵۵ برای SPI و از ۰/۳۳ به ۰/۵۵ برای SPEI افزایش یافته است). مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI نیز برتری شاخص SPEI را در حالت حذف ایستگاه‌های واقع در زراعت دیم نشان می‌دهد.

#### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که برای ارزیابی خشک‌سالی، توجه به نوع کاربری اراضی و روش کشت در بالا بردن کارایی شاخص‌های SPI و SPEI کاملاً ضروریست. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که شاخص SPEI در شرایطی که تبخیر در بیلان آبی منطقه سهم بیشتری داشته باشد از کارایی بیشتری نسبت به SPI برخوردار است. از سویی، تنوع در کاربری اراضی سبب کاهش دقت در روابط میان شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و خشک‌سالی کشاورزی سنجش‌ازدوری می‌گردد. تبیین شاخص‌های متناسب برای هر کاربری می‌تواند رویکرد جدید در تحقیقات آینده باشد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌سالی، شاخص‌های خشک‌سالی، SPEI، سنجش‌ازدور، VHI

#### مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی، منابع طبیعی، امنیت غذایی و اقتصاد بسیاری از جوامع را مورد تهدید قرار داده و سبب نگرانی‌های مهم امنیتی برای آب و غذا و نیز چالش‌های مالی و اقتصادی، به‌ویژه برای کشورهای درحال توسعه شده است (Aghakouchak et al., 2015). افزایش دما و کاهش بارش، اصلی‌ترین مشخصه‌های خشک‌سالی هستند. افزایش دما باعث افزایش تبخیر و تعرق در منطقه شده و رویش‌ها را با بحران کم‌آبی مواجه می‌کند. کاهش میزان بارش هم به‌طور مستقیم بحران کم‌آبی را موجب می‌شود. از مهمترین پیامدهای خشک‌سالی، کاهش مقدار پوشش گیاهی به دلیل افزایش حرارت و تبخیر و تعرق است. با کاهش پوشش گیاهی، شرایط محیطی برای بروز مشکلات مختلف مانند فرسایش خاک، افزایش میزان رواناب سطحی و خطر بروز سیل و ... فراهم می‌شود. بر این اساس، ارزیابی آثار خشک‌سالی بر روی پوشش گیاهی از اهمیت زیادی برخوردار است (Kogan, 1995). شاخص‌های گوناگونی برای تعیین وضعیت خشک‌سالی‌ها وجود دارد که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سادگی محاسبات و در دسترس بودن اطلاعات و آمار موردنیاز، سبب شده تا برخی از این شاخص‌ها در تحلیل خشک‌سالی از مقبولیت جهانی زیادی برخوردار باشند. از معروف‌ترین این شاخص‌ها

می‌توان از شاخص استاندارد شده بارش (SPI)، شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق (SPEI) و شاخص استاندارد شده نام برد. شاخص SPI یکی از شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی است که توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳) به‌منظور شناسایی و پایش خشک‌سالی ارائه شد. این شاخص به دلیل بی‌بعد و استاندارد بودن، توانایی مقایسه خشک‌سالی در مناطق مختلف، با اقلیم‌های متفاوت و خشک‌سالی‌های رخ داده‌شده در سال‌های مختلف را دارد. هدف SPI اختصاص یک ارزش عددی به بارندگی است که بتوان نواحی با آب‌وهوای کاملاً متفاوت را مقایسه کرد. اهمیت شاخص SPI در نیاز اطلاعاتی کم و محاسبه نسبتاً ساده آن است. این شاخص فقط از داده‌های بارندگی ماهانه استفاده می‌کند و برای تشخیص کمبود میزان بارندگی در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه) طراحی شده است (Vicente-Serrano et al., 2010). شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارش و ظرفیت تبخیر و تعرق بر پایه رابطه تورنتوایت استفاده می‌کند. شاخص SPEI یک شاخص خشک‌سالی چندمقیاسی ساده است که داده‌های بارش و دما را ترکیب می‌کند. SPEI از اختلاف بین بارش و تبخیر و تعرق ماهانه یا (هفتگی) استفاده می‌کند. بیلان آب اقلیمی که در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شده است، برای به دست آوردن

SPEI به کار می‌رود.

این پژوهش درصدد آن است که کارایی شاخص‌های SPI و SPEI را در مناطق با پوشش گیاهی طبیعی مرتعی و جنگلی واقع در بخش‌های مرتفع و کوهستانی (شمال و شرق استان) و نیز در مناطق کشاورزی جنوب استان که اغلب دارای کاربری کشاورزی دیم می‌باشند، مورد بررسی و ارزیابی قرار دهد و در نهایت با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای، میزان کارایی این دو شاخص را ارزیابی نماید. از زمان به کارگیری شاخص SPEI (سال ۲۰۱۰)، پژوهش‌های زیادی در زمینه اهمیت و مقایسه آن با شاخص SPI انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌گردد. [Nosrati](#) در سال ۲۰۱۳ در پژوهشی، به ارزیابی شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) برای شناسایی خشک‌سالی در اقلیم‌های مختلف ایران پرداختند. برای این منظور، داده‌های بارش و دمای ماهانه ایستگاه‌ها در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۷ تهیه و شاخص‌های خشک‌سالی محاسبه گردید. نتایج نشان داد شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده دارای همبستگی معنی‌دار بوده اما شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشک‌سالی داشته است. همچنین با افزایش مقیاس زمانی تداوم خشک‌سالی افزایش می‌یابد. [Damavandi](#) و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پایش زمانی- مکانی خشک‌سالی کشاورزی از طریق مجموعه‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST داده‌های سنجنده MODIS در استان مرکزی پرداختند. نتایج آنان دقت بسیار خوب روش استفاده از شاخص سنجنش‌ازدوری VHI را در پایش خشک‌سالی نشان داد. در این تحقیق شاخص SPI نیز برای ارزیابی صحت در طول دوره آماری استفاده شد. در تحقیقی دیگر، [Ghorbani](#) و همکاران (۲۰۱۸) به تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که هر چه اقلیم مرطوب‌تر باشد به دلیل کاهش نقش تبخیر و تعرق، همبستگی بین دو شاخص بیشتر

می‌شود. همچنین شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI دوره طولانی‌تری از خشک‌سالی را نشان می‌دهد. [Zhifang](#) و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک آنالیز مقایسه‌ای میان شاخص‌های SPI و SPEI در بازه‌های زمانی مختلف در مغولستان انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش بازه زمانی، تفاوت میان SPI و SPEI کاهش و با کاهش بازه اختلاف این دو شاخص کاهش می‌یابد. موضوع و مسئله مهمی که در بررسی خشک‌سالی‌های هواشناسی و کشاورزی وجود دارد این است که ارزیابی کارایی این شاخص‌ها در حالت ترکیبی پوشش گیاهی (منابع طبیعی و کشاورزی) بررسی می‌گردد. این در حالی است که پوشش کشاورزی باغی و زراعی آبی به دلیل استفاده از آبیاری‌های تکمیلی، سبب انحراف در نتایج حاصل از ارزیابی شاخص‌های خشک‌سالی می‌گردد. برای نمونه، [Zand](#) و همکاران (۲۰۲۳) از طریق ترکیبی از روش‌های میدانی، آماری و داده‌های مورد مطالعه (شامل ویژگی‌های کشاورزی دیم و آبی، ویژگی‌های منابع آب، نقشه کاربری اراضی) و شاخص‌های خشک‌سالی (هواشناسی و ماهواره‌ای) به بررسی رابطه بین شاخص SPI و شاخص‌های پوشش گیاهی VCI، TCI و VHI در استان خراسان پرداختند. روابط بین شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و ماهواره‌ای محاسبه و از طریق رگرسیون خطی تک و چندگانه، ارتباط میان آنها استخراج شد. همچنین، تطابق بین طبقات خشک‌سالی هواشناسی و پوشش گیاهی با استفاده از ماتریس مختلط بررسی گردید.

با توجه به بررسی ادبیات موجود و اهمیت شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی، این پژوهش به بررسی کارایی این دو شاخص با کمک شاخص‌های سنجنش‌ازدوری در پایش خشک‌سالی می‌پردازد. بدین مفهوم که علاوه بر مقایسه کارایی دو شاخص SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی، کارایی این دو شاخص با شاخص‌های خشک‌سالی سنجنش‌ازدوری مورد راستی‌آزمایی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، مقایسه این دو شاخص در شرایط پوشش گیاهی طبیعی (جنگل‌ها و مراتع) و کشاورزی دیم (باغ‌ها و زراعت دیم) در مقایسه با شرایط مخلوط عملکرد شاخص‌ها،

کوه‌های البرز قرار گرفته که ارتفاع آن تا ۵۰۰۰ متر در نواحی شرق افزایش پیدا می‌کند. با توجه به طبقه‌بندی اقلیمی، آب‌وهوای تهران نیمه گرم و نیمه خشک است و میانگین بارش سالانه این منطقه حدود ۲۳۰ میلی‌متر و دمای آن حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۱ موقعیت استان تهران و کاربری‌های آن را نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این استان برای این پژوهش، وجود تفاوت میان نوع پوشش گیاهی طبیعی در شمال و پوشش گیاهی کشاورزی در جنوب استان می‌باشد. حتی در پوشش کشاورزی موجود در استان تهران، تفاوت در زراعت از نوع دیم در باغ‌ها و زراعت‌های شمال و شرق و نیز زراعت و باغ‌های آبی موجود در جنوب تهران وجود دارد. این تنوع در نوع پوشش و نوع آبیاری می‌تواند برای ارزیابی کارایی شاخص‌های SPI و SPEI در حالت کلی پوشش گیاهی و در حالت جدا کردن نوع پوشش گیاهی بسیار مهم و ضروری باشد.

مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بر این اساس، اهداف اختصاصی تحقیق عبارت‌اند از:

تعیین روند تغییرات خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه با

استفاده شاخص‌های SPI و SPEI

بررسی ارتباط بین شاخص‌های ارزیابی خشک‌سالی SPI

و SPEI با شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای انتخاب بهترین

ارتباط و ارائه مدل‌های رگرسیونی

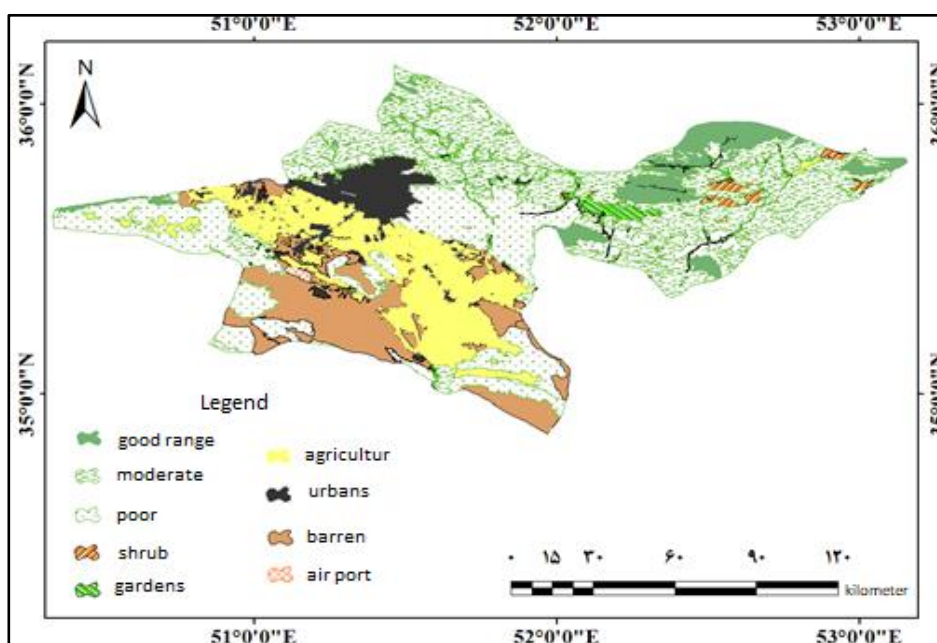
مقایسه کارایی شاخص‌های SPI و SPEI در مناطق با

پوشش گیاهی طبیعی و کاربری کشاورزی دیم

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

استان تهران با وسعت تقریبی ۱۳ هزار کیلومترمربع، به دلیل جایگاه ویژه آن و خسارت‌هایی که طی خشک‌سالی‌های اخیر متحمل شده، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. نواحی شمالی این استان در دامنه‌های جنوبی رشته



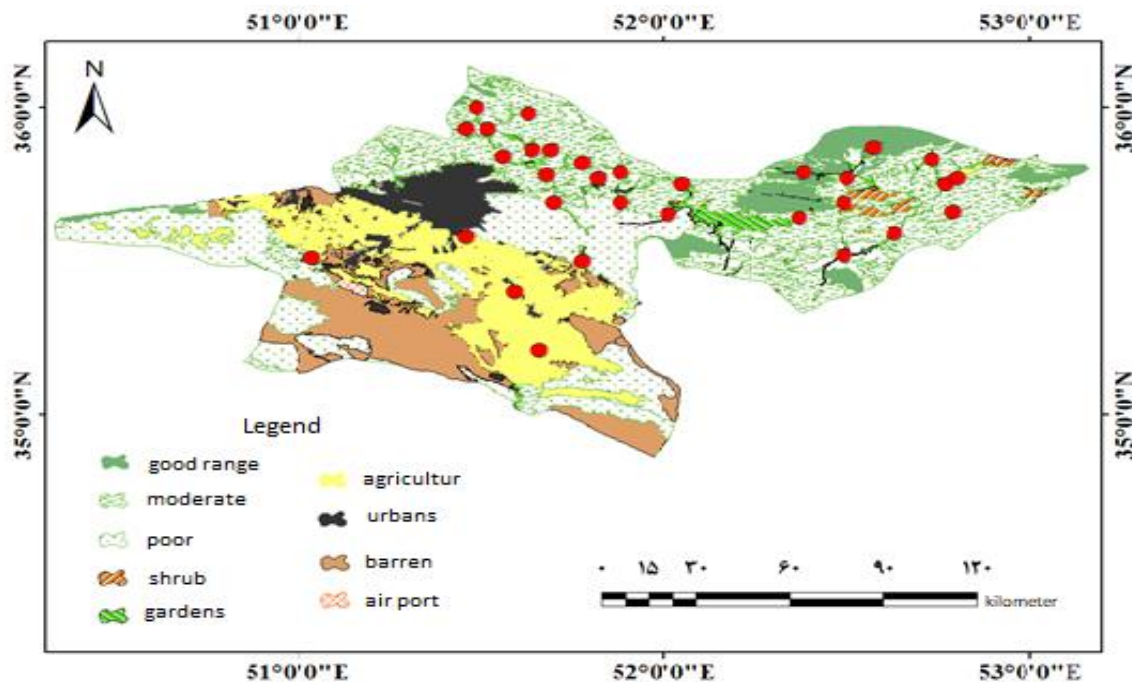
شکل ۱- نقشه استان تهران با کاربری‌های آن

Figure 1-Tehran Province map with its land use

## اطلاعات پایه و هواشناسی

نقشه کاربری اراضی استان از آخرین نقشه کاربری اراضی کشور استخراج گردید (شکل ۲). براساس نقشه مذکور، کاربری‌های مرتع، اراضی کشاورزی آبی و اراضی بایر غالب هستند. بنابراین به منظور ارزیابی شاخص‌های SPI و SPEI،

می‌توان کارایی آنها در اراضی با پوشش طبیعی بدون کشاورزی و با در نظر گرفتن اراضی کشاورزی در جنوب استان قیاس نمود. شاخص‌های SPI و SPEI نیز براساس آمار بارش ایستگاه‌های هواشناسی به‌دست‌آمده از سازمان هواشناسی کشور محاسبه گردید.



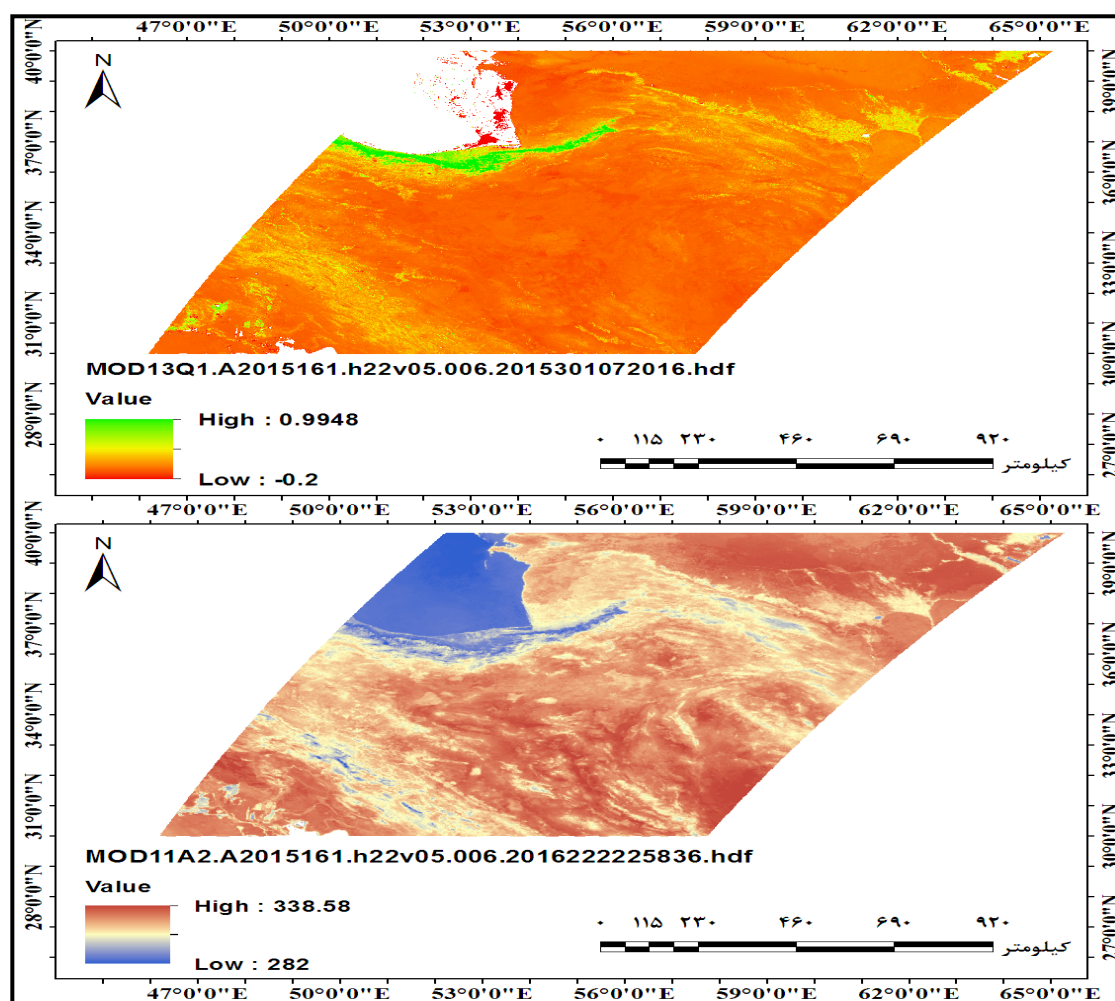
شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی بر روی کاربری‌های مختلف استان تهران

Figure 2- The location of meteorological stations on various land uses in Tehran Province

## تهیه تصاویر ماهواره‌ای

داده‌های دورسنجی مورد استفاده، از مجموعه تصاویر ماهواره Terra و سنجنده MODIS است. سنجنده MODIS علاوه بر تهیه تصاویر، داده‌های پردازش‌شده‌ای نیز تولید می‌کند که به‌عنوان محصولات MODIS به کاربران عرضه می‌شود. محصولات شانزده‌روزه شاخص NDVI در قالب فایل MOD13Q1 و محصولات هشت‌روزه دمای سطح زمین در قالب فایل MOD11A2 با فرمت (Hierarchical Data Form) hdf استفاده شده است. از این محصولات تعداد ۴۰ تصویر MOD13Q1 و تعداد ۸۰ تصویر MOD11A2، از

سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ (۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸) برای ماه خرداد (۲۲ می تا ۲۱ ژوئن) از سایت NASA (ladsweb) دریافت شد. زمان انتخابی داده‌های ماهواره‌ای براساس تاریخ شروع به کار سنجنده MODIS و موجود بودن تصاویر از سال ۲۰۰۰ انتخاب شد. همچنین مانند زمین مرجع کردن، کالیبراسیون تابش، حذف اثر ابر، درجه حرارت اتمسفری و بخارآب بر روی این محصولات توسط NASA انجام شده است. شکل ۳، تصاویر محصولات NDVI و LST استفاده‌شده در تهیه شاخص‌های گیاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمونه تصویر سنجنده مودیس برای شاخص NDVI (بالا) و LST (پایین)

Figure 3-Sample of MODIS image for NDVI (up) and LST(down)

#### روش پژوهش

انتخاب پایه زمانی مشترک، بازسازی، آزمون همگنی و

بررسی صحت داده‌های بارش

برای اجرای این پژوهش، از آمار بارندگی ۳۱ ایستگاه هواشناسی واقع در استان به صورت ماهانه استفاده شد. اسامی و مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آمده است. ایستگاه‌ها بر مبنای طول دوره آماری، پوشش مناسب مکانی در منطقه مورد مطالعه و قابل اعتماد بودن داده‌های آماری انتخاب شده‌اند. با توجه به متفاوت بودن تعداد سال‌های آماری ایستگاه‌ها، داده‌های بارش با پایه زمانی مشترک ۳۱ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۸) محاسبه گردید.

محاسبه شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

از بین شاخص‌های کمی در تحلیل خشک‌سالی، شاخص SPI به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای دوره‌های متفاوت زمانی و مقیاس‌های مکانی مختلف، به عنوان شاخص مناسب برای تحلیل خشک‌سالی از مقبولیت جهانی برخوردار است. در این پژوهش، به منظور تشخیص خشک‌سالی هواشناسی و ارزیابی شدت سطوح مختلف آن، از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس ۳ ماهه استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات مربوط به ایستگاه‌های مورد پژوهش

Table 1-Characteristics of study area stations

| Hight(m) | Station Type        | Latitude | Longitude | Station Name   | Number |
|----------|---------------------|----------|-----------|----------------|--------|
| 1720     | rain gauge station  | 35° 84'  | 51° 56'   | Rodak          | 1      |
| 1563     | Evaporation station | 35° 76'  | 51° 68'   | Latian         | 2      |
| 1950     | rain gauge station  | 35° 86'  | 51° 64'   | Kand Sofla     | 3      |
| 1050     | Evaporation station | 35° 51'  | 51° 04'   | Parandak       | 4      |
| 2500     | rain gauge station  | 36° 00'  | 51° 48'   | Shemshak       | 5      |
| 2500     | rain gauge station  | 35° 98'  | 51° 63'   | Garmabdar      | 6      |
| 2100     | rain gauge station  | 35° 93'  | 51° 46'   | Ahar           | 7      |
| 2200     | rain gauge station  | 35° 82'  | 51° 78'   | Lavasan Bozorg | 8      |
| 1980     | rain gauge station  | 35° 93'  | 51° 52'   | Fasham         | 9      |
| 950      | rain gauge station  | 35° 40'  | 51° 59'   | Bagher Abad    | 10     |
| 861      | Evaporation station | 35° 21'  | 51° 66'   | Javad Abad     | 11     |
| 2100     | rain gauge station  | 35° 85'  | 51° 69'   | Afjeh          | 12     |
| 1600     | rain gauge station  | 35° 69'  | 51° 87'   | Gol Khandan    | 13     |
| 1380     | rain gauge station  | 35° 68'  | 51° 70'   | Sanjarian      | 14     |
| 2050     | rain gauge station  | 35° 77'  | 51° 82'   | Vasefjan       | 15     |
| 2020     | rain gauge station  | 35° 79'  | 51° 88'   | Ardineh        | 16     |
| 2170     | rain gauge station  | 35° 74'  | 52° 05'   | Cheshmeh Ala   | 17     |
| 1740     | rain gauge station  | 35° 65'  | 52° 01'   | Mara           | 18     |
| 1050     | rain gauge station  | 35° 58'  | 51° 46'   | Ghani Abad     | 19     |
| 1150     | rain gauge station  | 35° 50'  | 51° 78'   | Hamamak        | 20     |
| 1965     | rain gauge station  | 35° 75'  | 52° 77'   | Firozkoh       | 21     |
| 1665     | rain gauge station  | 35° 59'  | 52° 63'   | Enzeha         | 22     |
| 2132     | rain gauge station  | 35° 83'  | 52° 73'   | Jalizjand      | 23     |
| 2424     | Evaporation station | 35° 86'  | 52° 56'   | Lazor          | 24     |
| 1495     | Evaporation station | 35° 52'  | 52° 49'   | Simin Dasht    | 25     |
| 2388     | rain gauge station  | 35° 78'  | 52° 37'   | Najafdar       | 26     |
| 2133     | rain gauge station  | 35° 76'  | 52° 50'   | Voshtan        | 27     |
| 2250     | rain gauge station  | 35° 66'  | 52° 79'   | Pir Deh        | 28     |
| 2300     | rain gauge station  | 35° 69'  | 52° 49'   | Kahnak         | 29     |
| 1970     | rain gauge station  | 35° 77'  | 52° 80'   | Amirieh        | 30     |
| 2100     | rain gauge station  | 35° 64'  | 52° 37'   | Seyd Abad      | 31     |

ایستگاه‌های با رنگ زرد ایستگاه‌هایی هستند که در کاربری زراعت آبی قرار دارند

تفسیر شود که SPI کوتاه مدت نسبت به شرایط رطوبتی بسیار حساس است و با کوچک ترین تغییر در بارندگی ماهانه، SPI به سرعت پاسخ می دهد، اگر این تغییرات مثبت باشد SPI به بالای صفر نوسان می کند و چنانچه تغییرات منفی باشد، SPI به زیر صفر نوسان می کند. این قابلیت SPI را به عنوان یک ابزار قوی برای پایش شرایط رطوبتی و تغییرات کوتاه مدت (خشک سالی کشاورزی) نشان می دهد (Choi et al., 2013). در این تحقیق، به منظور محاسبه خشک سالی توسط شاخص بارش استاندارد شده، از اطلاعات بارندگی ماهانه مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی واقع در استان تهران استفاده شد و

از آنجایی که کمبود بارش در مقیاس های زمانی کوتاه مدت، عمدتاً بر روی وضعیت رطوبت خاک و بعد بر روی پوشش گیاهی اثر می گذارد و در مقیاس های طولانی مدت اغلب بر روی آب های زیرزمینی، جریان رودخانه و ذخایر منابع آب مؤثر است، بنابراین براساس توصیه های تحقیقات مشابه، از بازه سه ماهه استفاده گردید. بدان معنی که بارش منجر به تولید شاخص خشک سالی SPI منتهی به خرداد (فروردین، اردیبهشت و خرداد) مدنظر قرار می گیرد. SPI در مقیاس زمانی سه ماهه نوسان های زیادی دارد و در مقیاس زمانی بلند مدت این نوسان ها کاهش می یابد و می تواند چنین

(۲)

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 + d_2 W^2 + d_3 W^3}$$

$W = \sqrt{-2 \ln(p)}$  که مقادیر ثابت در فرمول بالا است، عبارت‌اند از:  $d_1 = 1/432788$ ،  $d_2 = 0/189269$ ،  $C_1 = 0/802853$ ،  $C_0 = 2/515517$ ،  $d_3 = 0/001308$ ،  $C_2 = 2/515517$ ، مقدار  $W$  از رابطه حاصل می‌شود که در آن مقدار  $P$  برای  $P \leq 0.5$  برابر است با  $P = 1 - F(x)$  و برای  $P > 0.5$  برابر است با  $P = F(x)$  و علامت مقدار  $SPEI$  بعکس می‌شود. متوسط  $SPEI$  برابر صفر و انحراف معیار آن برابر ۱ است.  $SPEI$  یک متغیر استاندارد شده است و می‌تواند با مقادیر دیگر  $SPEI$  در زمان و مکان دیگر مقایسه شود. در توسعه شاخص  $SPEI$ ، از مفاهیم شاخص  $SPI$  استفاده شده است. بنابراین مقادیر طبقه‌های مختلف شدت خشک‌سالی در آن مشابه با طبقه‌های ارائه شده توسط McKee برای شاخص  $SPI$  است که در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی وضعیت خشک‌سالی براساس شاخص

$SPEI$  و  $SPI$

Table 2-Classification of drought condition based on  $SPI$  and  $SPEI$

| $SPI/SPEI$ values | Moisture Category |
|-------------------|-------------------|
| $\geq 2.00$       | Extreme Wet       |
| 1.5 to 1.99       | Severe Wet        |
| 1 to 1.49         | Moderate Wet      |
| 1.5 to 0.5        | weak Wet          |
| 0.49 to -0.49     | Normal            |
| -0.99 to -0.5     | weak Drought      |
| -1.99 to -1       | Moderate Drought  |
| -1.99 to -1.5     | Severe Drought    |
| $\leq -2.00$      | Extreme Drought   |

محاسبه شاخص  $SPI$  با استفاده از نرم‌افزار DIP انجام گردید. این نرم‌افزار از تارنمای اداره هواشناسی استان اردبیل تهیه شد. ورودی این نرم‌افزار داده‌های بارندگی ماهانه یا سالانه است که در نهایت از آن شاخص  $SPI$  استخراج می‌شود. برای این منظور، داده‌های بارندگی ماهانه ۳۱ ایستگاه با طول دوره آماری ۳۱ سال (۱۳۶۸-۱۳۹۸) به نرم‌افزار داده شد و شاخص  $SPI$  در مقیاس سه‌ماهه به دست آمد.

شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده ( $SPEI$ )

این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارش و ظرفیت تبخیر و تعرق بر پایه رابطه تورنتوایت استفاده می‌کند. شاخص  $SPEI$  یک شاخص خشک‌سالی چندمقیاسی ساده است که داده‌های بارش و دما را ترکیب می‌کند (Vicente-Serrano et al., 2010).  $SPEI$  از اختلاف بین بارش و تبخیر و تعرق ماهانه یا (هفتگی) استفاده می‌نماید. بیلان آب اقلیمی که در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شده است، برای به دست آوردن  $SPEI$  به کار می‌رود. برای محاسبه شاخص  $SPEI$ ، در گام نخست باید مقدار ظرفیت تبخیر و تعرق ( $PET$ ) در همراه محاسبه شود. پس از محاسبه  $PET$ ، اختلاف بارش ( $P$ ) و  $PET$  برای هر ماه  $i$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$Di = Pi - PETi$$

(۱)

محاسبه شاخص  $SPEI$  مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب به مجموعه طولانی مدت داده‌های  $Di$  در بازه زمانی دلخواه است. در نتیجه برای محاسبه  $F(x)$  از توابع توزیع تجمعی مختلف استفاده شد تا در نهایت بهترین تابع توزیع تجمعی برای هر ایستگاه مشخص شود. شاخص  $SPEI$  با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

## شاخص‌های سنجش‌ازدوری

شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

این شاخص از معروف‌ترین شاخص‌های پایش خشک‌سالی به‌شمار می‌رود. شاخص NDVI می‌تواند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های اقلیمی در ارزیابی و پایش خشک‌سالی باشد (Ba Aghideh et al., 2011). این شاخص از نسبت اختلاف طیف مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و طیف قرمز (Red) به مجموع آنها طبق رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

از نظر تئوریک مقدار این شاخص در محدوده  $[-1, +1]$  متغیر است ولی محدوده آن در عمل کمتر از ۱ و بیشتر از -۱ است. مقدار این شاخص برای پوشش گیاهی متراکم به‌سوی عدد ۱ میل می‌کند و بعکس ابرها، برف و آب ارزش‌های منفی این شاخص را تولید می‌کنند. سنگ و خاک بایر که واکنش‌های طیفی مشابهی در دو باند مورد استفاده دارند، مقادیر کوچک مثبت یا منفی نزدیک به صفر می‌توانند داشته باشند.

## شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI)

این شاخص براساس ارتباط میان مقدار واقعی NDVI و مقادیر NDVI در بهترین (NDVImax) و بدترین (NDVimin) شرایط رطوبتی فصل رشد گیاهی به دست می‌آید. این روش درصد میزان شرایط غالب تغییرات پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. هرگاه مقادیر شاخص VCI به صفر نزدیک شود، خشک‌سالی شدید می‌باشد. این شاخص از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100 \quad (4)$$

## شاخص شرایط حرارتی (TCI)

شاخص TCI را Kogan در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد کرد و

الگوریتم محاسباتی آن شبیه شاخص VCI است، ولی رابطه آن برای انعکاس پاسخ حرارتی پوشش گیاهی تعریف شده است. این شاخص برای تعیین دمای مرتبط با تنش پوشش گیاهی و تنش ناشی از رطوبت بیش‌ازحد استفاده می‌شود.

(۵)

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \times 100$$

دمای سطح زمین (LST) با استفاده از تصاویر مختلف ماهواره‌ای قابل محاسبه است. در سنجنده MODIS باندهای حرارتی ۳۱ و ۳۲ برای برآورد دمای سطح زمین قابل استفاده هستند.

## شاخص سلامت گیاهی (VHI)

ترکیبی از شاخص‌های VCI و شاخص شرایط دمایی (TCI) است که هدف آن دخیل کردن شرایط رطوبت پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین در یک شاخص مجموع است. این شاخص توانایی نمایش آثار خشک‌سالی هم بر پوشش گیاهی و هم بر درجه حرارت سطح زمین را دارد (Kogan, 1995).

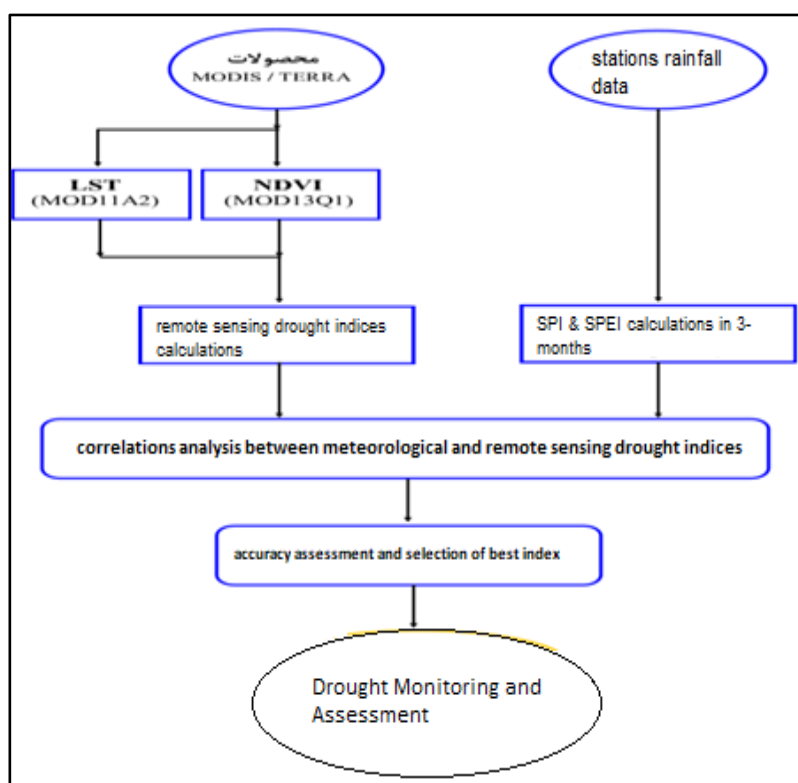
$$VHI = (0.5 \times VCI) + (0.5 \times TCI) \quad (6)$$

جدول ۳- رتبه‌بندی خشک‌سالی با شاخص‌های VCI, TCI و

## VHI

Table 2-Classification of drought based on VCI, TCI and VHI

| Drought Type     | Index values |
|------------------|--------------|
| No Drought       | $\geq 40$    |
| Weak Drought     | 39.9 to 30   |
| Moderate Drought | 29.9 to 20   |
| Severe Drought   | 19.9 to 10   |
| Extreme Drought  | $\leq 10$    |



شکل ۴- طرح‌واره روش تحقیق

Figure 5- Research methodology flowchart

## نتایج

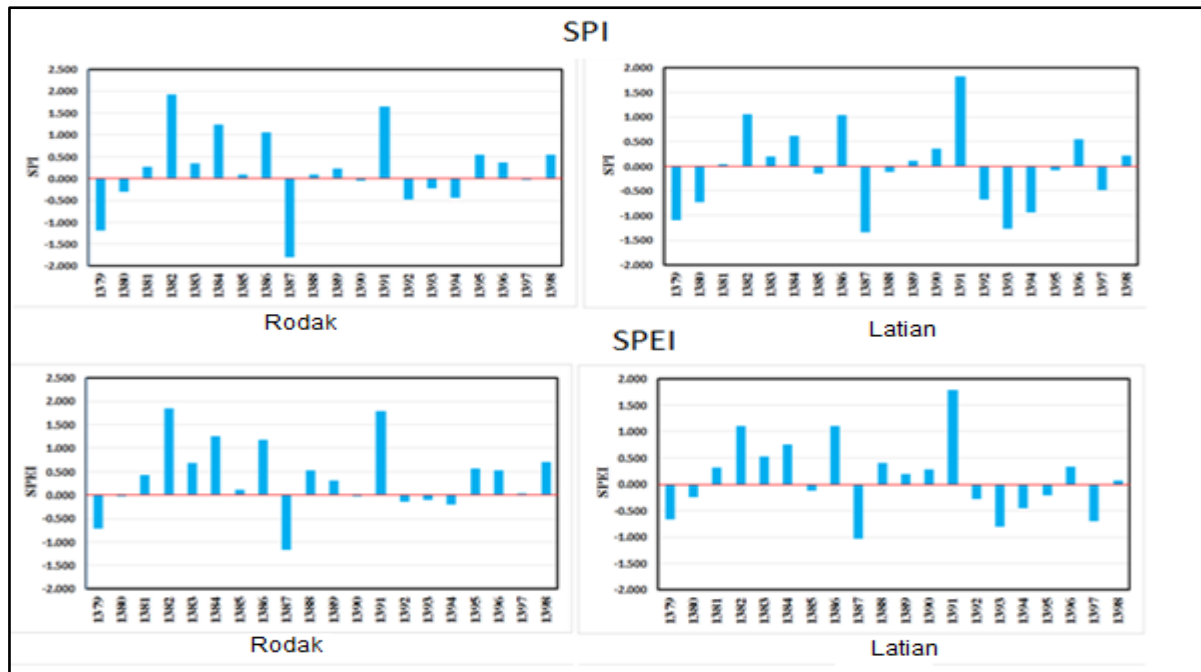
خشک‌سالی در استان تهران از شرایط تصادفی برخوردار است و دوره تداوم خشک‌سالی و شدت و ضعف آن نیز متغیر است. شرایط اقلیمی و توپوگرافی استان تهران به گونه‌ای است که در شمال و شرق استان از دشت‌های با بارندگی کم و کشاورزی بیشتر از نوع آبی و در مناطق مرتفع بیشتر مراتع و باغ‌ها با بارش رگباری و بیشتر نسبت به جنوب استان برخوردار هستند. برای آنکه بتوان وضعیت خشک‌سالی را با دقت بیشتری از طریق شاخص‌های خشک‌سالی تعیین کرد، ضروری است تا ایستگاه‌های واقع شده در اراضی کشاورزی با کشت آبی در جنوب استان را از فهرست ایستگاه‌ها حذف کرد. مطابق با توزیع ایستگاه‌ها، در صورت حذف ایستگاه‌های پرنک (واقع در شهرستان رباط کریم)، غنی‌آباد (واقع در شمال شهرستان ری)، جوادآباد (واقع در شهرستان ورامین)، باقرآباد (واقع در شهرستان قرچک) و حمامک (واقع در شهرستان پاکدشت) که در مناطق با کاربری کشاورزی آبی

بررسی خشک‌سالی هواشناسی با شاخص‌های نقطه‌ای مبتنی بر ایستگاه‌های هواشناسی انجام می‌شود. برای این منظور، شاخص SPEI و SPI برای بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ برای بازه ۳ ماهه منتهی به خردادماه محاسبه و رفتار این دو شاخص مقایسه می‌گردد. در ادامه، با توجه به تأثیر خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها بر میزان پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین، این تغییرات توسط شاخص‌های NDVI و LST و رفتار طیفی شاخص‌های مجموعه زمانی مربوط به این دو شاخص در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ (VHI، TCI، VCI) برای خردادماه محاسبه و ارزیابی می‌گردد.

مقادیر به‌دست‌آمده شاخص SPI، در مقیاس سه‌ماهه برای همه ایستگاه‌ها محاسبه شده است (شکل ۵). نمودارهای به‌دست‌آمده از این شاخص نشان می‌دهد که وضعیت

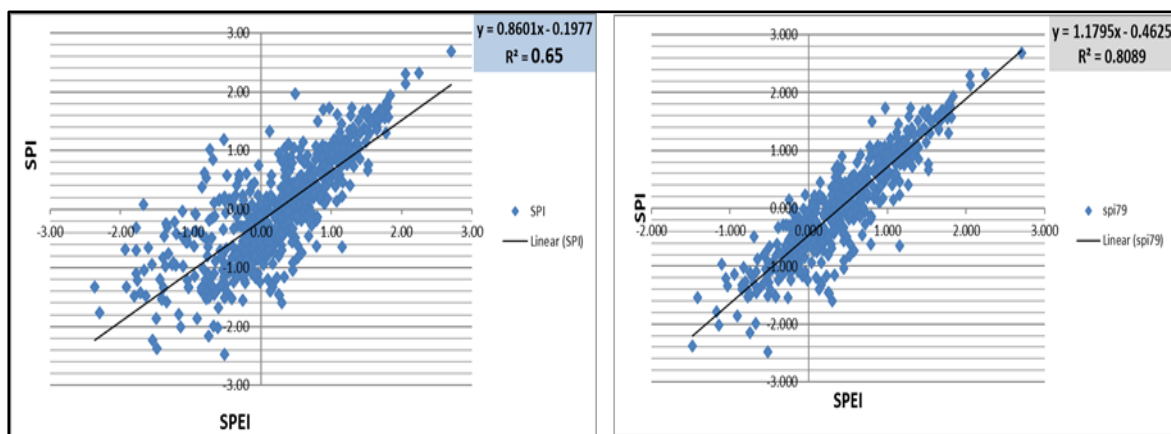
باقی‌مانده نماینده مناطق بدون دخالت انسان در پوشش گیاهی هستند. این مهم را در نمودار شاخص ایستگاه‌های مذکور می‌توان مشاهده کرد.

هستند، درواقع بقیه ایستگاه‌ها بیانگر کاربری از نوع مرتعی و باغی می‌باشند. با توجه به مساحت کم اراضی باغی در شرق استان که ایستگاهی نیز در آن وجود ندارد، ۲۶ ایستگاه



شکل ۵- نمودار شاخص SPI و SPEI در دو ایستگاه رودک و لتیان

Figure 5- SPI and SPEI index diagram at Rudak and Latian stations



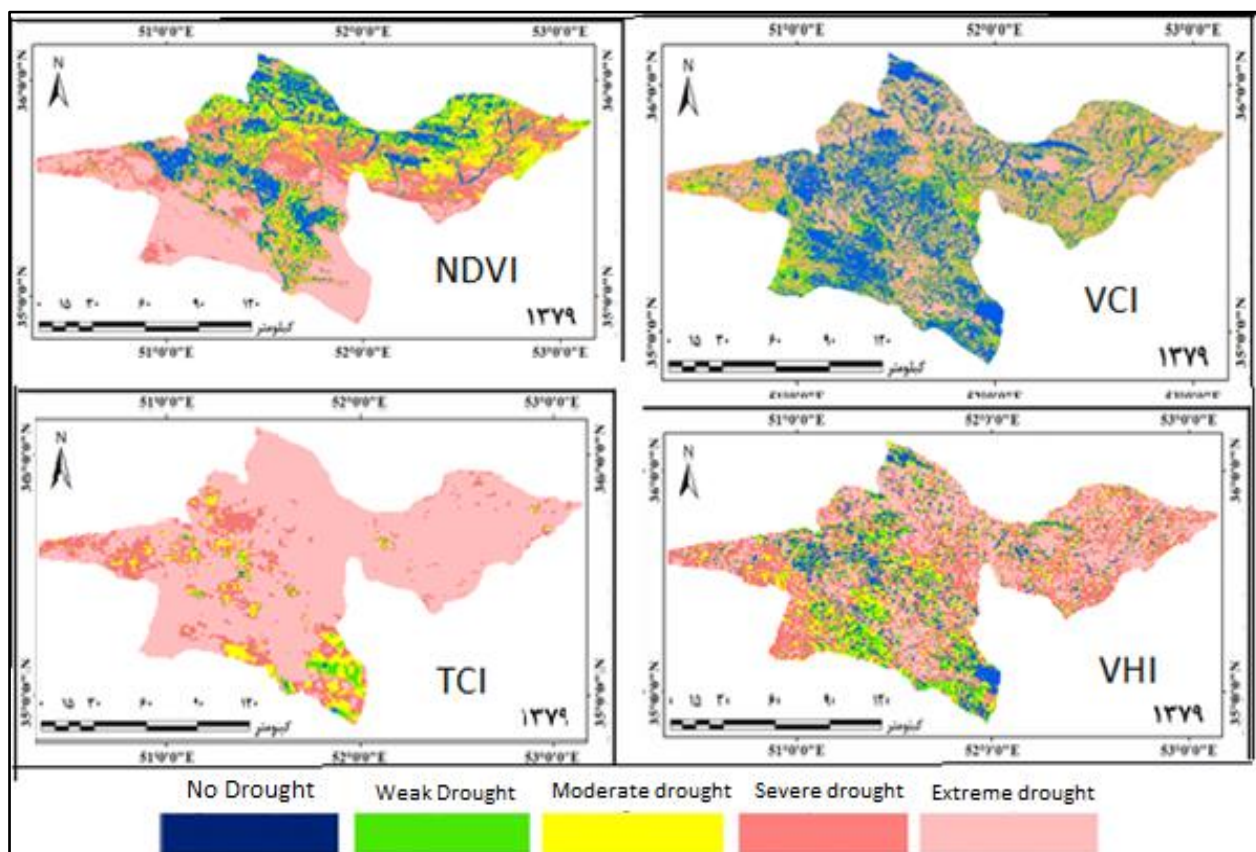
شکل ۶- نمودار رابطه شاخص SPI و SPEI در حالت کلی (چپ) و حذف ایستگاه‌های واقع در زراعت دیم (راست)

Figure 6-Diagram of the relationship between SPI and SPEI in the general case (left) and excluding stations located in rain fed agriculture(right)

این مقایسه در دو حالت کلی و حذف ایستگاه‌ها انجام شد. از آنجایی که تفاوت معنی‌داری در مقادیر بارش ایستگاه‌های

به‌منظور بررسی آثار منفی ۵ ایستگاه واقع در جنوب استان تهران بر رابطه و همبستگی شاخص‌های SPI و SPEI،

جنوبی استان نسبت به دیگر ایستگاه‌ها وجود دارد، بنابراین همبستگی شاخص‌های SPI و SPEI پس از حذف



شکل ۷- پهنه‌بندی شدت خشک‌سالی با شاخص‌های ماهواره‌ای در سال ۱۳۷۹

Figure 7- Drought severity zoning with satellite indicators in 2000

نمایند مساحتی حدود ۶/۵ هکتار بر روی زمین است. بدین‌صورت که لایه استک (توده) تصاویر ماهواره‌ای ایجاد گردید. در ادامه نقاط ایستگاه‌ها به‌صورت شیب فایل ایجاد شد. درنهایت مقادیر شاخص‌های ماهواره‌ای در محل ایستگاه‌ها برای بازه زمانی ۲۰ ساله استخراج گردید تا محاسبات آماری لازم انجام شود.

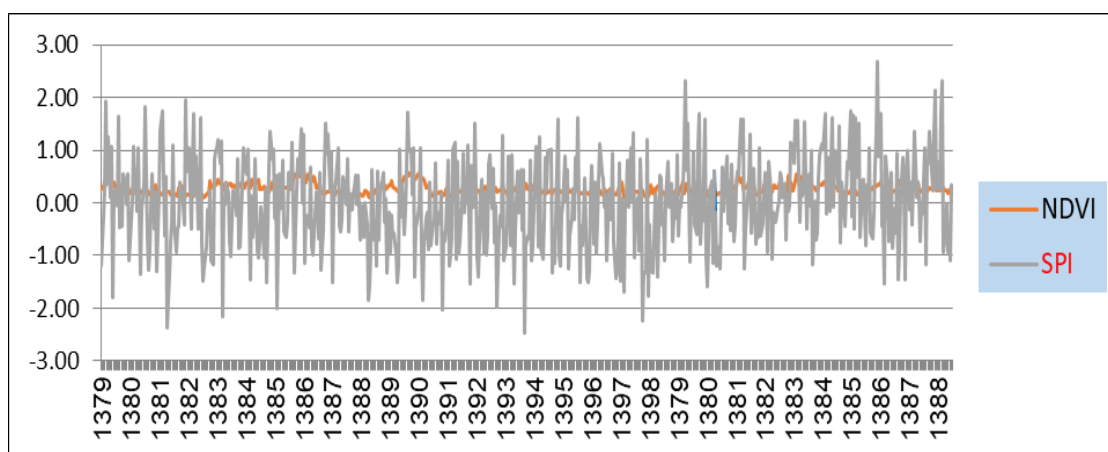
استخراج مقادیر شاخص‌های ماهواره‌ای از تصاویر و نقشه‌های خشک‌سالی

پس از تهیه نقشه‌های طبقات خشک‌سالی کشاورزی (پوشش گیاهی)، مقادیر این طبقات در محل ایستگاه‌های ۳۱ گانه در استان تهران با استفاده از برنامه ArcGIS استخراج گردید (جدول ۴). یادآوری می‌شود که مقادیر هر ایستگاه

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی ماهواره‌ای استخراج‌شده در محل ایستگاه (مربوط به سال ۱۳۸۰)

**Table 4- Values of satellite drought indices extracted at the station location (regarding 2001)**

| Station        | NDVI | VCI   | TCI   | LST    | VHI   |
|----------------|------|-------|-------|--------|-------|
| Rodak          | 0.3  | 45.67 | 13.11 | 312.80 | 18.37 |
| Latian         | 0.18 | 16.20 | 0.00  | 318.03 | 4.27  |
| Kand Sofla     | 0.12 | 0.00  | 0.00  | 313.91 | 6.53  |
| Parandak       | 0.12 | 26.25 | 83.32 | 318.76 | 45.4  |
| Shemshak       | 0.35 | 53.83 | 11.63 | 304.53 | 16.02 |
| Garmabdar      | 0.32 | 32.96 | 15.70 | 303.75 | 22.93 |
| Ahar           | 0.26 | 23.71 | 0.00  | 308.77 | 0.61  |
| Lavasan Bozorg | 0.53 | 67.76 | 5.07  | 312.16 | 43.29 |
| Fasham         | 0.19 | 28.90 | 13.81 | 309.21 | 40.22 |
| Bagher Abad    | 0.15 | 33.81 | 20.33 | 317.73 | 27.74 |
| Javad Abad     | 0.19 | 0.00  | 18.60 | 317.36 | 9.30  |
| Afjeh          | 0.49 | 41.37 | 16.64 | 309.39 | 25.04 |
| Gol Khandan    | 0.14 | 14.80 | 28.87 | 316.63 | 14.53 |
| Sanjarian      | 0.20 | 22.33 | 5.02  | 319.69 | 11.85 |
| Vasefjan       | 0.24 | 53.13 | 8.01  | 316.21 | 19.71 |
| Ardineh        | 0.27 | 27.10 | 5.68  | 313.16 | 23.09 |
| Cheshmeh Ala   | 0.20 | 22.17 | 22.29 | 311.88 | 23.42 |
| Mara           | 0.20 | 33.89 | 31.21 | 314.19 | 36.47 |
| Ghani Abad     | 0.13 | 11.10 | 6.38  | 314.24 | 46.59 |
| Hamamak        | 0.12 | 8.98  | 27.79 | 318.35 | 15.15 |
| Firozkoh       | 0.19 | 33.04 | 0.00  | 308.00 | 0.00  |
| Enzeha         | 0.28 | 48.12 | 25.61 | 312.17 | 17.18 |
| Jalizjand      | 0.12 | 0.00  | 20.14 | 310.41 | 18.27 |
| Simin Dasht    | 0.30 | 13.10 | 5.34  | 317.51 | 16.67 |
| Lazor          | 0.20 | 0.00  | 8.64  | 306.71 | 4.43  |
| Najafdar       | 0.15 | 0.00  | 2.14  | 308.05 | 23.91 |
| Voshtan        | 0.25 | 13.57 | 0.00  | 312.07 | 16.25 |
| Pir Deh        | 0.15 | 0.00  | 5.74  | 311.35 | 24.77 |
| Kahnak         | 0.26 | 2.54  | 8.12  | 312.15 | 40.6  |
| Amirieh        | 0.40 | 73.76 | 0.00  | 308.00 | 0.00  |
| Seyd Abad      | 0.20 | 0.00  | 16.57 | 315.67 | 16.76 |



شکل ۸- منحنی تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI با NDVI

**Figure 8- Curve of changes in SPI and SPEI indices with NDVI**

گرفت. جدول ۵ همبستگی میان شاخص‌های سنجش‌ازدوری و شاخص SPI و SPEI سه‌ماهه را در دو حالت (کلی و حذف ۵ ایستگاه واقع در کشت آبی) نشان می‌دهد. بیشترین ضریب همبستگی برای SPI با شاخص VHI (۰/۵۷) و برای SPEI با شاخص TCI (۰/۵) است.

بررسی روابط همبستگی بین شاخص‌های گیاهی و شاخص SPI و SPEI در حالت کلی همبستگی شاخص‌های پوشش گیاهی (VCI، NDVI، VHI، TCI) با شاخص SPI و SPEI سه‌ماهه از سال ۱۳۷۹-۱۳۹۸ به‌طور همزمان در خردادماه مورد بررسی قرار

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های گیاهی و شاخص SPI و SPEI سه‌ماهه

Table 5- Pearson correlation coefficient between plant indices and quarterly SPI and SPEI indices

| VHI    | TCI    | LST    | VCI    | NDVI   | Vegetation Indices |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
|        |        |        |        |        | Meteorology Index  |
| 0.55** | 0.55** | 0.4**  | 0.39** | 0.35** | SPI-3              |
| 0.47** | 0.5**  | 0.38** | 0.37** | 0.32** | SPEI-3             |

\*\*\*، \*\*: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد

SPI سه‌ماهه برخوردارند و شاخص‌های TCI و VHI بیشترین همبستگی را با شاخص SPEI سه‌ماهه دارند.

براساس اطلاعات جدول ۵، شاخص‌های TCI و VHI نسبت به شاخص‌های دیگر از بیشترین همبستگی با شاخص

جدول ۶- نتایج رگرسیون بین مقادیر شاخص SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری پوشش گیاهی

Table 6- Regression results between SPI index values and remotely sensed vegetation indices

| adjusted R-squared | Correlation Coefficient | Regression Model                                      |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|
| 0.4**              | 0.63**                  | SPI-3 = 3.583+0.007 VHI+0.006 VCI-0.014 LST+0.004 TCI |
| 0.33**             | 0.56**                  | SPEI-3 = 6.634+1.581 NDVI+0.007 VHI-0.023 LST         |

\*\*\*، \*\*: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد

(NDVI) توانسته است ۴۳ درصد از تغییرات متغیر وابسته (SPEI سه‌ماهه) را برآورد کند. براساس اطلاعات جدول ۷، شاخص‌های TCI و VHI نسبت به شاخص‌های دیگر از بیشترین همبستگی با شاخص SPI سه‌ماهه و شاخص SPEI سه‌ماهه برخوردارند.

با توجه به اطلاعات جدول ۶، مدل‌سازی رگرسیونی در بهترین حالت نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل شاخص‌های پوشش گیاهی (VCI، NDVI، VHI، TCI) توانسته است ۴۰ درصد از تغییرات متغیر وابسته (SPEI سه‌ماهه) را برآورد نماید. متغیرهای مستقل شاخص‌های پوشش گیاهی (LST، VHI و

جدول ۷- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های گیاهی و شاخص SPI سه‌ماهه (حذف ایستگاه‌ها)

**Table 8 - Pearson correlation coefficient between vegetation indices and quarterly SPI index (removal of stations)**

| VHI    | TCI    | LST    | VCI    | NDVI   | Vegetation Indices Meteorology Index |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------|
| 0.52** | 0.44** | 0.41** | 0.4**  | 0.38** | SPI-3                                |
| 0.65** | 0.54** | 0.49** | 0.46** | 0.45** | SPEI-3                               |

\*\*\*، \*\*: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد

جدول ۸- نتایج رگرسیون بین مقادیر شاخص SPI و شاخص‌های سنجش‌ازدوری پوشش گیاهی (حذف ایستگاه‌ها)

**Table 9- Regression results between SPI index values and vegetation remote sensing indices (removal of stations)**

| Adjusted R-squared | Correlation Coefficient | Regression Model                              |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| 0.55**             | 0.74**                  | SPI-3 = - 0.834+0.007VHI+0.007VCI+0.005 TCI   |
| 0.54**             | 0.73**                  | SPEI-3 = -0.267+0.007 VHI+0.006 VCI-0.003 TCI |

\*\*\*، \*\*: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد

صحت‌سنجی مدل‌های رگرسیونی با ۲۰ درصد (۴ سال) از سال‌های باقیمانده توسط ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین خطای انحراف انجام شد. با توجه به مقادیر خطاهای به‌دست‌آمده نتایج عملکرد مدل‌ها نسبتاً خوب ارزیابی می‌شود و این در حالی است که تفاوت چندانی هم میان مدل‌ها در میزان عملکرد و دقت آنها وجود ندارد.

مدل‌سازی رگرسیونی در بهترین حالت نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل شاخص‌های پوشش گیاهی (VHI TCI و VCI) توانسته است ۵۵ درصد از تغییرات متغیر وابسته (SPI سه‌ماهه) را برآورد نماید. متغیرهای مستقل شاخص‌های پوشش گیاهی (LST، VHI و NDVI) توانسته است ۵۴ درصد از تغییرات متغیر وابسته (SPEI سه‌ماهه) را برآورد کند.

جدول ۹- نتایج ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی SPI و SPEI

**Table 11- Results of accuracy evaluation of SPI and SPEI regression models**

| (MBE) Mean Bias Error | (MAE) Mean absolute error | (RMSE) Root-mean-square deviation | Index  |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------|
| -0.04                 | 0.66                      | 0.81                              | SPI-3  |
| -0.08                 | 0.34                      | 0.45                              | SPEI-3 |

## بحث

نتایج مطالعات مختلف در جهان نشان می‌دهد که شاخص‌های ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع و پیوستگی به همراه شاخص‌های هواشناسی مبتنی بر ایستگاه‌های زمینی می‌توانند به‌طور مؤثرتری روند تغییرات مکانی و زمانی

مقایسه مقادیر آماره‌های ارزیابی دقت مدل‌های ارتباط دو نوع از شاخص‌های خشک‌سالی (هواشناسی و پوشش گیاهی) نیز حکایت از دقت بالاتر مدل‌ها در حالت پس از حذف ایستگاه‌های در جنوب استان تهران که دارای کاربری کشاورزی آبی هستند، دارد.

شمشک ۲۵۰۰ متر در شمال استان حدود ۱۶۰۰ متر است. این تفاوت در مقدار بارش (باریده شده) در نقاط مختلف استان مؤثر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های شمالی و شمال‌شرقی به دلیل ارتفاع بیشتر، میانگین کل بارش آنها نسبت به مناطق مرکزی و جنوبی بیشتر است. براساس نتایج حاصل از شاخص SPI، شدیدترین وضعیت وقوع خشک‌سالی در طول دوره مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲، ۱۳۸۹، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ اتفاق افتاده است که طی آن مقدار SPI به بیش از ۲- رسیده است. از نظر استمرار و توالی خشک‌سالی، بیشترین تکرار آن در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ بوده است.

شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI علاوه بر بارش، مقادیر تبخیر و تعرق را نیز مدنظر قرار می‌دهد. این شاخص در مناطقی که تبخیر و تعرق سهم بیشتری در بیلان آبی دارد از کارایی بیشتری نسبت به SPI برخوردار است ([Zhifang et al., 2020](#)). نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی توسط شاخص NDVI نشان می‌دهد که سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰، ۱۳۸۷، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ بیشترین و شدیدترین خشک‌سالی‌ها را داشته‌اند. شاخص VCI در جدا کردن طبقات مختلف خشک‌سالی محدودیت دارد و مقادیر فراوانی از این شاخص در یک طبقه خشک‌سالی قرار می‌گیرند که کاربرد این شاخص در پایش خشک‌سالی را منوط به ارزیابی بیشتر و دقیق‌تر در اقلیم‌های متنوع می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان همبستگی میان شاخص‌های سنجش‌ازدوری و شاخص هواشناسی SPI در حالت کلی، برای شاخص VHI بوده است ([Damavandi et al., 2016](#)). برای شاخص SPEI، بهترین همبستگی با شاخص TCI در بین شاخص‌های گیاهیست. با توجه به اینکه شاخص VHI ترکیبی از شاخص‌های TCI و VCI است، به همین دلیل انتظار می‌رود که این شاخص بتواند با دخیل کردن شرایط رطوبت پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین در برآورد خشک‌سالی عملکرد بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها به‌ویژه در مقیاس کوتاه‌مدت داشته باشد. همبستگی این شاخص با شاخص SPI در سطح یک درصد، ۵۷/۰ و با شاخص SPEI برابر ۴۷/۰ است. این نتایج با

خشک‌سالی را پایش کنند. در سال‌های اخیر، محققان تلاش کرده‌اند تا به‌طور همزمان عوامل مؤثر در فرایند مطالعه خشک‌سالی را در نظر بگیرند. این ایده اساس برخی از شاخص‌ها مانند SPI، SPEI، NDVI و LST است. استفاده از مجموعه‌های زمانی بارش و درجه حرارت سطح زمین همراه با واکنش پوشش گیاهی به این تغییرات حرارت و پوشش، برای ارزیابی خشک‌سالی بسیار مهم است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های منفرد دارند. این نتیجه با نتایج [AghaKouchak](#) و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت داشت. همان‌طور که گفته شد شاخص‌های متعددی وجود دارد که گویای وضعیت خشک‌سالی در منطقه هستند، با وجود این هیچ‌یک از این شاخص‌ها به‌طور ذاتی نسبت به دیگری ارجحیت ندارند و نمی‌توان عملکرد آنها را در سطح منطقه‌ای دیگر تضمین نمود، تنها می‌توان گفت بعضی از این شاخص‌ها در شرایطی خاص، عملکرد بهتری دارند. نحوه عملکرد هر یک از این شاخص‌ها به اقلیم، توپوگرافی، سطح منطقه، نوع پوشش گیاهی و نوع خاک منطقه وابسته است ([Luong and Tran, 2024](#)). نتایج این محققان در پی آن است تا وابستگی شاخص‌های خشک‌سالی به این پارامترها را کاهش دهند تا شاخصی جامع و عمومی برای پایش نزدیک به زمان واقعی خشک‌سالی ارائه نمایند. در این پژوهش به بررسی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI و خشک‌سالی کشاورزی (پوشش گیاهی) از طریق شاخص‌های سنجش‌ازدوری پرداخته شد. استان تهران شامل مناطق با پوشش گیاهی مرتعی و درختچه‌ای و نیز اراضی دیم در ارتفاعات و اراضی کشاورزی آبی در جنوب است. با توجه به اینکه کشاورزی در جنوب استان از طریق آبیاری است، بنابراین پوشش گیاهی حاصل در زمان خشک‌سالی، سبب ایجاد داده‌های نادرست می‌شود. به همین دلیل ایستگاه‌های واقع در این مناطق در بررسی‌ها می‌بایست از فهرست ایستگاه‌ها حذف شده تا نتایج درست‌تر و تحلیل‌ها واقعی‌تر باشند. در استان تهران تفاوت ارتفاع بین پست‌ترین ایستگاه یعنی جوادآباد ۸۶۱ متر در جنوب و مرتفع‌ترین ایستگاه یعنی

یافته‌های (Singh et al., 2003) همخوانی دارد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI دارای همبستگی بالایی در این تحقیق بودند و در حالت حذف ایستگاه‌های واقع در منطقه کشاورزی این همبستگی بالاتر است. به‌طور کلی در این پژوهش ارزیابی همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی (سنجش‌ازدوری) و شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI نشان می‌دهد که شاخص‌های TCI و VHI از نظر آماری نسبت به سایر شاخص‌ها دارای دقت بالاتری در پایش خشک‌سالی هستند اما این موضوع دلیل بر ناکارآمد بودن سایر شاخص‌ها در برآورد خشک‌سالی نیست. مطالعات انجام شده با استفاده از شاخص‌های مختلف با توجه به محل اجرا و شرایط محیطی، نتایج متفاوتی را نشان می‌دهند، در نتیجه امکان مقایسه کلی بین شاخص‌ها وجود ندارد (Zand et al., 2023). در این تحقیق مقایسه معادلات حاصل از شاخص SPI و SPEI در حالت کلی بیانگر دقت بیشتر شاخص SPI نسبت به شاخص SPEI است. تحلیل این موضوع نیز به بارش کمتر و تبخیر بیشتر در ایستگاه‌های جنوبی استان برمی‌گردد. در حالی که در حالت حذف ایستگاه‌ها، دقت شاخص SPEI بالاتر از SPI است. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که شاخص SPEI در شرایطی که شاهد تبخیر و تعرق بیشتری در منطقه باشیم از کارایی بیشتری نسبت به SPI برخوردار است. از سویی، تنوع در کاربری اراضی سبب کاهش دقت در روابط میان شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و خشک‌سالی کشاورزی سنجش‌ازدوری می‌گردد. بنابراین، تبیین شاخص‌های متناسب

برای هر کاربری می‌تواند رویکرد جدید در تحقیقات آینده باشد.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، شاخص‌های گیاهی TCI و VIH و تصاویر MODIS می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در برآورد خشک‌سالی باشند. استفاده از نقشه‌های حاصل از شاخص‌های خشک‌سالی می‌تواند به بهبود برنامه‌های مدیریت خشک‌سالی کمک نموده و نقش بسزایی را در کاهش آثار خشک‌سالی داشته باشد. استفاده از سنجش‌ازدور به‌منظور پایش خشک‌سالی، این توانایی را به ما می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تراکم ایستگاه‌های هواشناسی کم می‌باشد بتوان با تخمینی قابل قبول، به ارزیابی خشک‌سالی پرداخت. به‌این ترتیب، مدیران و سیاست‌گذاران می‌توانند با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی، مناطق حساس و مستعد خشک‌سالی را شناسایی و اولویت‌های کاری را در زمینه مدیریت جامع منابع تعیین نمایند. نتایج این تحقیق می‌تواند در واقعی کردن پایش خشک‌سالی‌ها و پیش‌بینی آنها به محققان و سازمان‌های دولتی برنامه‌ریز کمک شایانی نماید. در همین راستا، پیشنهاد می‌گردد اندازه‌گیری‌های زمینی تغییرات کمی پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین به‌منظور مطالعات تکمیلی برای پایش مکانی خشک‌سالی انجام شود و به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، توصیه می‌شود تا منابع خطا مانند سطوح شهری، اراضی کشاورزی آبی در انجام محاسبات به حداقل برسد و از تصاویر با دقت بالاتر مانند لندست استفاده شود.

## References

- 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): 452-480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Ba aghideh, M., Alijani, B. and Ziaei, P., 2011.

- Investigating the possibility of using NDVI vegetation index in analyzing droughts in Isfahan province. *Arid Regions Geographic Studies*, Volume 2, Issue 4, July 2011, Pages 1-16.
- Choi, M., J.M. Jacobs, M.C. Anderson and D.D. Bosch., 2013. Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology*, 476: 265-273.

- <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.042>
- Damavandi, A.A., Rahimi, M., Yazdani, M.R. and Norozi, A.A., 2016. Spatial monitoring of agricultural drought through time series of NDVI and LST indices of MODIS data (Case study: Markazi Province). *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, Volume 25, Issue 99 (in Persian). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2016.23200>
  - Fazel Dehkordi, L., Sohrabi, T.S., Ghanaviz Baf, M.H., and Ghazavi, R., 2016. Drought monitoring using MODIS images in arid regions: A case study of Isfahan province rangelands. *Geography and Environmental Planning*. <https://doi.org/10.22108/gep.2017.98067>
  - Ghorbani, K., Salari Jazi, M., Rezaei Ghaleh, L., 2024. Evaluation of MSDI bivariate drought index based on precipitation and runoff (Arazkouse and Galikesh stations of Golestan province). *Journal of the Climate Change Research*, Vol. 4, No. 16. <https://doi.org/10.30488/ccr.2023.426470.1179>
  - Kogan FN., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv Space Res* 15(11):91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
  - Luong, V.V.; Tran, T.T.T., 2024. Drought sensitivity analysis of meteorological and vegetation indices in Dak Nong, Vietnam. *J. Water Clim. Change*, 15, 4968-4988. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.661>
  - McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17 (22): 179-183.
  - Nosrati, K., 2013. Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for Drought Identification in Different Climates of Iran. *Journal of Environmental Sciences*.
  - Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and LópezMoreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23 (7): 1696-1718.
  - Singh, R.P, Sudipa, Roy and Kogan, F., 2010. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India . *International Journal of Remote Sensing*, Volume 24, 2003 - Issue 22.
  - Zand, M., Miri, M., Kousari, M.R., Ghermez cheshmeh, B., 2023. Investigation of Lag Time Correlation between Agricultural and Meteorological Droughts, *Water Harvesting Research*, Vol. 6, No. 1, Spring & Summer 2023. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2023.6602.1094>
  - Zhifang, P., Shibo, F., Lei, W. and Wunian, Y., 2020. Comparative Analysis of Drought Indicated by the SPI and SPEI at Various Timescales in Inner Mongolia, China. *Water* 2020, 12(7), 1925; <https://doi.org/10.3390/w12071925>. <https://doi.org/10.3390/w12071925>