


Drought zoning in Yazd Province using PNPI and SIAP

Razieh Zarei Mahmoodabadi¹, Mohammad Sadegh Talebi² 

1. Department of Surveying Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. E-mail: rzarei@tvu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Geography, Meybod University, Meybod, Iran. E-mail: talebi@meybod.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 Jul 2025
Revised 6 Sep 2025
Accepted 25 Sep 2025
Published 30 Sep 2025

Keywords:
Drought,
PNPI,
SIAP,
Spearman's Correlation Coefficient.

ABSTRACT

Objective: Drought is recognized as one of the most widespread, frequent, and significant natural hazards globally, and particularly in Iran. Accordingly, continuous monitoring of drought is essential as a critical tool for effective management and mitigation of its impacts. In past decades, drought analysis has predominantly been descriptive; however, contemporary approaches emphasize the use of precipitation-based indices to enable quantification, precise evaluation, and efficient monitoring of this phenomenon. The present study aims to monitor drought conditions in Yazd Province using two precipitation-related indices: the Percentage of Normal Precipitation Index (PNPI) and the Standardized Index of Annual Precipitation (SIAP).

Method: Methodologically, the research is applied in nature and employs a descriptive-analytical approach. Annual precipitation data from 11 synoptic stations across the province over 25 years (2000–2024) were utilized as the statistical population of the study. In the implementation phase, following data preparation and validation tests, the selected indices were calculated for each station within the study period. Subsequently, various interpolation methods were assessed within the ArcGIS environment, and the Inverse Distance Weighting (IDW) technique was identified as the optimal method. Using this approach, spatial zoning maps for the PNPI and SIAP indices were generated and analyzed.

Results: The analysis of the maps and corresponding data revealed that the years 2002, 2008, 2013, 2014, 2019, and 2020 experienced the most severe drought conditions across the province. In contrast, the years 2001, 2007, 2015, 2021, 2022, and 2023 were characterized by more favorable conditions, with the absence of drought in most regions.

Conclusion: Based on Spearman's correlation test, a strong and direct relationship was observed between the PNPI and SIAP indices and the amount of precipitation.

Cite this article: Zarei Mahmoodabadi R, Talebi MS. Drought zoning in Yazd province using PNPI and SIAP. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(3): 41-50.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.13390.1019>.



Introduction

Drought is one of the most pervasive and impactful natural hazards globally, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. Its complex and gradual nature, along with its far-reaching socio-economic and environmental consequences, underscores the need for accurate monitoring and evaluation. Over the past decades, traditional drought analyses have primarily relied on descriptive assessments. However, with advancements in data processing and geospatial technologies, the utilization of quantitative, precipitation-based indices has become essential for effective drought monitoring and early warning systems.

This study focuses on the central province of Yazd, which is highly vulnerable to drought due to its low annual precipitation and desert climate. The main objective is to monitor and evaluate drought patterns across the province using two key precipitation-based indices: the Percent of Normal Precipitation Index (PNPI) and the Standardized Annual Precipitation Index (SIAP). By applying geostatistical interpolation methods in GIS, particularly the Inverse Distance Weighting (IDW) method, this research aims to provide spatially distributed drought maps, identify temporal trends, and assess the correlation of these indices with precipitation records. The results are intended to support regional water resource management and strategic planning for climate adaptation.

Method

This applied research adopts a descriptive-analytical approach to monitor drought conditions across Yazd province over 25 years (2000–2024). Annual precipitation data from 11 synoptic stations were collected and verified for completeness and consistency. Two precipitation-based drought indices, PNPI (Percent of Normal Precipitation Index) and SIAP (Standardized Annual Precipitation Index), were calculated using Microsoft Excel. These indices quantify drought severity based on deviations from long-term precipitation averages.

To visualize and analyze the spatial distribution of drought across the province, various interpolation methods available in ArcGIS were evaluated, including Kriging, Spline, and Inverse Distance Weighting (IDW). The accuracy of these methods was assessed using Root Mean Square Error (RMSE) values from control stations. IDW was selected as the optimal interpolation technique due to its lower error rates. Using this method, zoning maps for both PNPI and SIAP were generated for each year. In addition, the Spearman rank correlation coefficient was employed in MATLAB to measure the statistical relationship between the indices and observed precipitation data across stations.

Results

The spatial and temporal analysis of drought conditions in Yazd province using PNPI and SIAP indices revealed significant interannual variability in drought severity and extent. The results indicate that the years 2002, 2008, 2013, 2014, 2019, and 2020 experienced the most

severe droughts, with over 90% of the province affected in some cases. In contrast, years such as 2001, 2007, 2015, 2021, 2022, and 2023 were characterized by favorable precipitation conditions and minimal drought coverage.

The spatial maps generated through the IDW method showed a high degree of consistency between PNPI and SIAP, confirming their reliability in capturing drought patterns. Moreover, the Spearman correlation coefficients between the two indices and annual precipitation were very high—often reaching values close to or equal to 1—which underscores the strong dependence of both indices on precipitation variability.

These findings confirm that PNPI and SIAP are effective tools for drought monitoring in arid regions and can be reliably used in early warning systems and resource planning efforts in central Iran.

Conclusion

This study demonstrates the effectiveness of PNPI and SIAP indices in monitoring drought patterns across Yazd province over 25 years. The strong correlation of both indices with precipitation data confirms their reliability in quantifying drought severity in arid and semi-arid climates. The spatial distribution maps produced using the IDW interpolation method offer valuable insights into drought-prone areas and temporal fluctuations in drought intensity.

Given the increasing frequency and severity of drought events in recent decades, especially in central Iran, the application of reliable and precipitation-based indices such as PNPI and SIAP is crucial for effective water resource management, early warning systems, and long-term climate adaptation strategies. The methodology and findings of this research provide a practical framework for policymakers and planners to anticipate drought impacts and design appropriate mitigation measures.

Declarations

Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

Competing interests

Conflict of Interest – None

Availability of data and materials

Data will be made available on the request.

Authors Contributions

Razieh Zarei Mahmoodabadi was responsible for collecting library resources, statistical data, and conducting field surveys. The corresponding author carried out the data analysis, compilation, and interpretation of the study materials.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.



پهنه‌بندی خشک‌سالی در استان یزد با استفاده از SIAP و PNPI

راضیه زارعی محمودآبادی^۱، محمدصادق طالبی^۲

۱. گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران. رایانامه: rzarei@tvu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: talebi@meybod.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: خشک‌سالی یکی از فراگیرترین، پرشمارترین و مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در سطح جهانی و به‌ویژه در ایران به‌شمار می‌آید. از این‌رو، پایش مستمر آن به‌عنوان ابزاری ضروری در راستای مدیریت و کاهش اثرات آن حائز اهمیت است. در دهه‌های گذشته، تحلیل خشک‌سالی به‌طور عمده ماهیتی توصیفی داشته است، اما امروزه به‌منظور کمی‌سازی، ارزیابی دقیق و پایش مؤثر این پدیده، از شاخص‌های وابسته به بارش بهره گرفته می‌شود. مطالعه حاضر با هدف پایش خشک‌سالی در استان یزد با استفاده از دو شاخص درصد بارش نرمال (PNPI) و استاندارد بارش سالانه (SIAP) انجام پذیرفته است.

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

روش: این پژوهش از لحاظ هدف، کاربردی و از نظر روش‌شناسی، توصیفی-تحلیلی می‌باشد. داده‌های بارش سالانه ۱۱ ایستگاه سینوپتیک استان طی دوره ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) به‌عنوان جامعه آماری تحقیق در نظر گرفته شده‌اند. در گام‌های اجرایی، پس از آماده‌سازی داده‌ها و انجام آزمون‌های صحت و کفایت، شاخص‌های موردنظر برای ایستگاه‌های منتخب در دوره مطالعاتی محاسبه شدند. سپس روش‌های مختلف درون‌یابی در محیط نرم‌افزار ArcGIS ارزیابی و در نهایت روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) به‌عنوان روش بهینه انتخاب گردید. به‌کمک این روش، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های PNPI و SIAP تهیه و تحلیل شدند.

کلیدواژه‌ها:
خشک‌سالی،
PNPI،
SIAP،
ضریب همبستگی اسپیرمن.

یافته‌ها: بررسی نقشه‌ها و نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهند که سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰ و بیش‌ترین شدت خشک‌سالی را در سطح استان تجربه کرده‌اند؛ در مقابل، سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۷، ۲۰۱۵، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ با شرایط مطلوب‌تر و فاقد خشک‌سالی در اغلب نقاط استان همراه بوده‌اند.

نتیجه‌گیری: براساس آزمون همبستگی اسپیرمن، ارتباطی مستقیم و کامل بین شاخص‌های PNPI و SIAP با میزان بارش مشاهده گردید.

استناد: زارعی محمودآبادی راضیه، طالبی محمدصادق. پهنه‌بندی خشک‌سالی در استان یزد با استفاده از PNPI و SIAP. منابع آب و تغییر اقلیم.

۱۴۰۴؛ (۳)۱: ۴۱-۵۰. <http://doi.org/10.22091/wrcc.2025.13390.1019>



۱- مقدمه

خشک‌سالی هواشناسی به دوره‌ای اطلاق می‌شود که در آن میزان بارش به‌طور قابل توجهی از مقدار نرمال و مورد انتظار کم‌تر است [۷].

خشک‌سالی هیدرولوژیکی براساس کاهش ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی تعریف می‌شود [۸].

خشک‌سالی کشاورزی زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک برای رفع نیازهای یک محصول خاص ناکافی باشد [۹]. این نوع خشک‌سالی بیش‌تر به کمبود رطوبت در خاک مرتبط است تا کاهش خود بارش، و به همین دلیل به‌طور معمول با تأخیری پس از خشک‌سالی هواشناسی بروز می‌کند [۱۰].

در نهایت، خشک‌سالی اقتصادی-اجتماعی زمانی اتفاق می‌افتد که کمبود منابع آب تأثیرات منفی بر زندگی و معیشت جوامع انسانی داشته باشد [۱۱].

ماهیت پویای خشک‌سالی، چالش‌های قابل توجهی را در زمینه برنامه‌ریزی، پیش‌بینی، پایش و ارائه کمک‌های بشردوستانه به مناطق آسیب‌پذیر ایجاد می‌کند [۱۲].

شاخص‌های خشک‌سالی نقش حیاتی در پایش مستمر این پدیده در مناطق و زمان‌های مختلف ایفا می‌کنند و سامانه‌های هشدار اولیه خشک‌سالی به‌طور عمده بر مبنای داده‌های ارائه‌شده توسط این شاخص‌ها استوار هستند [۱۳].

شاخص‌های متعددی برای ارزیابی خشک‌سالی پیشنهاد شده‌اند، از جمله شاخص شدت خشک‌سالی پالمر^۱ (PDSI) [۱۴]، شاخص رطوبت محصول^۲ (CMI) [۱۵]، شاخص بارش استاندارد شده^۳ (SPI) [۱۶]، شاخص دهک‌ها [۱۷]، شاخص تامین آب سطحی^۴ (SWSI) [۱۸]، و شاخص استاندارد بارش سالانه^۵ (SIAP) [۱۹].

سفریان زنگیر و همکاران با بهره‌گیری از داده‌های بارش جمع‌آوری شده از پنج ایستگاه سینوپتیک در استان اردبیل طی بازه زمانی ۱۹۹۶-۲۰۱۶، SPI و شاخص

خشک‌سالی به‌عنوان یک پدیده اقلیمی چندوجهی و ویران‌گر، تأثیرات گسترده‌ای بر ابعاد مختلف جوامع بشری و محیط زیست بر جای می‌گذارد. این پدیده، اقتصاد، بخش کشاورزی، سلامت عمومی و زیست‌بوم‌ها را در مناطق وسیعی تحت تاثیر قرار می‌دهد. بررسی آمار حاکی از آن است که در بازه زمانی ۱۹۶۷ تا ۱۹۹۱، نیمی از جمعیت ۲/۸ میلیارد نفری آسیب‌دیده از بلایای طبیعی، متاثر از خشک‌سالی بوده‌اند [۱]. در دهه‌های اخیر، با افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها در سطح جهانی، شاهد زیان‌های اقتصادی قابل توجه، تخریب منابع طبیعی، کاهش تولیدات کشاورزی و در نتیجه، بروز ناامنی غذایی و سوءتغذیه در میان میلیون‌ها نفر تجربه شده است [۲].

خشک‌سالی به‌عنوان یک ناهنجاری اقلیمی موقتی شناخته می‌شود و نباید با شرایط آب و هوایی خشک که به‌طور ذاتی در مناطق کم‌بارش وجود دارد، اشتباه گرفته شود [۳]. به‌طور کلی، خشک‌سالی به‌عنوان یک رویداد هواشناسی تعریف می‌شود که در آن میزان بارش در یک دوره زمانی طولانی، به‌طور قابل توجهی کم‌تر از میانگین آماری بلندمدت است [۴ و ۵].

از ویژگی‌های متمایزکننده خشک‌سالی نسبت به سایر بلایای طبیعی، می‌توان به ماهیت تدریجی و زمان‌بر تأثیرات آن، دشواری در تعیین زمان دقیق شروع و پایان، و گستردگی جغرافیایی وسیع مناطق تحت تأثیر آن اشاره کرد [۶].

خشک‌سالی به‌طور معمول براساس عامل اصلی ایجادکننده آن تعریف می‌شود. به‌طور کلی، این پدیده با توجه به علت وقوع و پیامدهای آن به چهار دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌گردد: هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی.

⁵- Standard Index of Annual Precepitation

¹- Palmer Drought Severity Index

²- Crop Moisture Index

³- Standard Precipitation Index

⁴- Surface Water Supply Index

از دو شاخص PNPI و SIAP و با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) در محیط GIS انجام شده است. این مطالعه تلاش دارد تا با تحلیل فضایی و زمانی داده‌های بارش و مقایسه شاخص‌های منتخب، تصویری دقیق و کاربردی از وضعیت خشک‌سالی در سطح استان ارائه دهد و زمینه را برای مدیریت بهینه منابع آب و برنامه‌ریزی‌های آینده فراهم سازد. به‌هنگام بودن داده‌ها، مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی و انتخاب مناسب‌ترین شاخص برای پهنه‌بندی خشک‌سالی از وجوه نوآوری این مطالعه محسوب می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان یزد در مرکز ایران واقع شده و در محدوده کوهستانی مرکزی ایران قرار دارد. این استان با وسعتی معادل ۱۳۱ هزار کیلومتر مربع، از شمال و غرب به استان اصفهان، از شمال شرق به استان خراسان جنوبی، و از جنوب به استان‌های کرمان و فارس محدود می‌شود. یزد در کمربند اقلیمی خشک و نیمه‌خشک نیم‌کره شمالی جای گرفته و دارای آب و هوای گرم و خشک است. بخش عمده‌ای از مساحت این استان را بیابان تشکیل می‌دهد و دمای هوا در فصل تابستان می‌تواند تا ۴۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. میانگین بارش سالانه در این استان حدود ۱۱۰ میلی‌متر گزارش شده است [۲۳]. محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

تغییرپذیری اقلیمی^۶ (CZI) را محاسبه و سپس با استفاده از روش درون‌یابی فاصله معکوس^۷ (IDW) در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه‌های پهنه‌بندی شده این شاخص‌ها را تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان دادند که SPI در مقایسه با شاخص CZI، کارایی بیش‌تری در پایش خشک‌سالی دارد [۲۰].

نیک‌بخت و همکاران با استفاده از داده‌های مربوط به شدت جریان آب در ۱۴ ایستگاه هیدرومتریک در شمال غربی ایران طی دوره اکتبر ۱۹۷۵ تا دسامبر ۲۰۱۹، به تحلیل شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی براساس شاخص درصد نرمال پرداختند. نتایج نشان دادند که شدیدترین دوره‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی در تمامی ایستگاه‌ها در سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۲ رخ داده‌اند. هم‌چنین، تحلیل روندها نشان‌دهنده افزایش شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی براساس شاخص درصد نرمال^۸ (PNI) در طول ۳۴ سال گذشته در منطقه مورد مطالعه بوده است [۲۱].

بروغنی و همکاران به بررسی همبستگی بین خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی در دشت سبزواری با استفاده از شاخص استاندارد آب^۹ (SWI) و SPI پرداختند. نتایج نشان دادند که خشک‌سالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی در این منطقه از الگوی مشخص و ثابتی پیروی نمی‌کنند و بیش‌ترین شدت و تکرار خشک‌سالی در بخش غربی دشت مشاهده شده است. در مقابل، بخش شرقی دشت در شرایط نرمال و حتی ترسالی قرار داشته است. هم‌چنین، تحلیل زمانی نشان داد که خشک‌سالی هیدرولوژیکی با یک تاخیر یک‌ساله نسبت به خشک‌سالی اقلیمی در منطقه رخ می‌دهد [۲۲].

با توجه به اهمیت پایش دقیق خشک‌سالی و اثربخشی شاخص‌های مبتنی بر بارش در ارزیابی این پدیده، پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل وضعیت خشک‌سالی در استان یزد طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، با بهره‌گیری

^۸- Percent of Normal Index
^۹- Standardized Water Index

^۶- Climate Variability Index
^۷- Inverse Distance Weighting

(۱) $PNPI = \frac{P_i}{\bar{P}} \times 100$

که در آن، P_i = نمایانگر میزان بارش در سال i ام و \bar{P} = نشان‌دهنده میانگین بارش بلندمدت ایستگاه مورد نظر است [۲۴ و ۲۵].

مقادیر حاصل از نمایه درصد نرمال ($PNPI$) و تفسیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۲۶ و ۲۷].

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی براساس

PNPI

Table 1. Classification of drought and wetness severity based on the PNPI

Category	PNPI Range
Extremely Severe Drought	Less than 40
Severe Drought	40 to 55
Moderate Drought	55 to 70
Mild Drought	70 to 80
Normal	80 to 120
Semi-Humid	120 to 130
Humid	130 to 145
Relatively Humid	145 to 160
Extremely Humid	More than 160

۳-۲- شاخص استاندارد بارش سالانه (SIAP)

شاخص استاندارد بارش سالانه (SIAP) مطابق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۴ و ۱۶]:

$$SIAP = \frac{P_i - \bar{P}}{P_{sd}} \quad (2)$$

که در آن، P_i = بارش سال مفروض، \bar{P} = میانگین بلندمدت بارش و P_{sd} = انحراف معیار بارش بلندمدت هستند. مقادیر شاخص معیار سالانه در جدول ۲ آمده است [۱۵]:

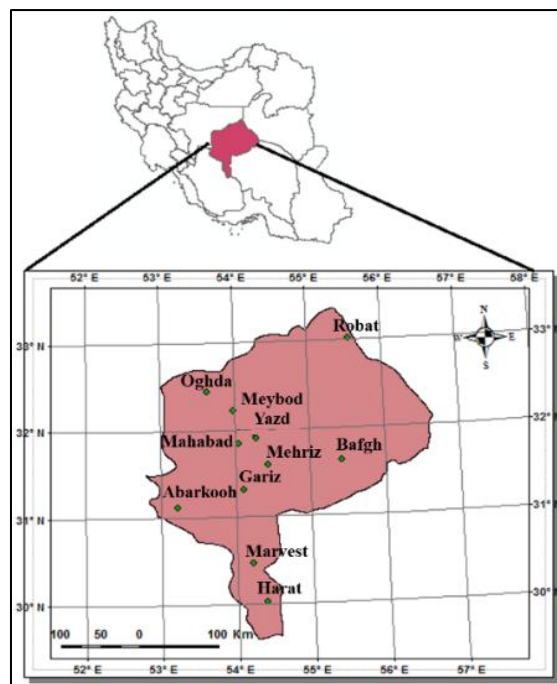


Figure 1. Location of the study area

شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

پژوهش حاضر با هدف کاربردی و با استفاده از رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. در این پژوهش، داده‌ها از طریق روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی، به صورت ترکیبی، جمع‌آوری گردیدند.

۲-۲- شاخص درصد بارش نرمال^{۱۰} (PNPI)

PNPI یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی و پایش خشک‌سالی محسوب می‌شود. این شاخص با هدف تعیین میزان انحراف بارش از حالت نرمال، از طریق تقسیم بارش واقعی بر مقدار بارش نرمال و سپس ضرب نتیجه در ۱۰۰ محاسبه می‌گردد.

PNPI به دلیل سادگی در محاسبه و تفسیر، ابزاری کارآمد در ارزیابی سریع وضعیت رطوبتی یک منطقه و شناسایی شرایط خشکی یا نرمال آن به‌شمار می‌رود. به‌عبارت دیگر، این شاخص، درصد بارش فعلی را نسبت به میانگین بارش بلندمدت (نرمال) منطقه مطابق با رابطه (۱) نشان می‌دهد.

¹⁰- Percent of Normal Precipitation Index

روش‌های متعددی برای انجام درون‌یابی وجود دارد که هر یک بر مبنای فرضیات و الگوریتم‌های متفاوتی استوار هستند.

در نرم‌افزار ArcGIS، سه روش رایج کریجینگ^{۱۱}، اسپلاین^{۱۲} و وزن‌دهی معکوس فاصله^{۱۳} (IDW) برای درون‌یابی داده‌ها قابل استفاده می‌باشند.

در این پژوهش، به‌منظور تعیین مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی شاخص‌های SIAP و PNPI، عملکرد روش‌های مذکور با استفاده از سه ایستگاه میبد، یزد و گاریز به‌عنوان نقاط کنترل، مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳- نتایج حاصل از مقایسه روش‌های درون‌یابی

Table 3. Results from the comparison of interpolation methods

Model	Method	RMSE (PNPI)	RMSE (SIAP)
Ordinary kriging	Spherical	2.35	0.12
	Circular	2.85	0.13
	Exponential	3.16	0.35
	Guassian	2.49	0.13
	Linear	2.94	0.22
Universal kriging	Linear with linear drift	2.8	0.18
	Linear with quadratic drift	2.9	0.56
Spline	Regularized	3.17	0.31
	Tension	3.38	0.56
	IDW	1.7	0.02

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی و ترسالی براساس SIAP

Table 2. Classification of drought and wetness severity based on the SIAP

Category	SIAP Range
Extremely Severe Drought	Less than -1.28
Severe Drought	-1.28 to -0.84
Moderate Drought	-0.84 to -0.52
Mild Drought	-0.52 to -0.25
Normal	-0.25 to +0.25
Mild Wetness	+0.25 to +0.52
Moderate Wetness	+0.52 to +0.84
Severe Wetness	+0.84 to +1.28
Extremely Severe Wetness	Greater than +1.28

۳- بحث و نتیجه گیری

پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های هواشناسی، شاخص‌های PNPI (شاخص مؤلفه‌ای استاندارد بارش) و SIAP (شاخص انحراف از میانگین بارش استاندارد) برای یازده ایستگاه منتخب در استان، طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel محاسبه شدند.

به‌منظور پایش خشک‌سالی در سطح کل استان و با هدف ایجاد تصویری جامع از وضعیت خشک‌سالی، پس از تعیین و به کارگیری یک روش درون‌یابی مناسب، نقشه‌های درون‌یابی این دو شاخص تهیه گردید.

۳-۱- بررسی روش‌های درون‌یابی

درون‌یابی به فرآیند تخمین یا تعیین مقادیر عددی در نقاطی بین داده‌های شناخته‌شده اطلاق می‌شود.

¹³- Inverse Distance Weighting

¹¹- Kriging

¹²- Spline

به گونه‌ای که در این سال، هیچ نقطه‌ای از استان در وضعیت خشک‌سالی قرار نداشت.

سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با پوشش بیش از ۹۰ درصدی خشک‌سالی در استان مشخص می‌شوند. در مقابل، سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ با شرایط مطلوب بارش در سراسر استان همراه بوده‌اند.

جدول ۴، درصد مساحت تحت تأثیر خشک‌سالی در استان یزد براساس تحلیل تصاویر طبقه‌بندی‌شده شاخص SIAP را نشان می‌دهد.

هم‌چنین، جدول ۵، درصد مساحت تحت تأثیر خشک‌سالی براساس تحلیل تصاویر طبقه‌بندی‌شده شاخص PNPI را ارائه می‌کند.

ساختار و فرمول شاخص‌های خشک‌سالی PNPI و SIAP نشان می‌دهد که بارش، تنها پارامتر مؤثر و تعیین‌کننده در عملکرد و رتبه‌بندی این شاخص‌ها است. به‌منظور تعیین میزان همبستگی بین شاخص‌های PNPI و SIAP با میزان بارش، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد.

انتخاب این ضریب به این دلیل است که شاخص‌های مذکور شدت خشک‌سالی را براساس رتبه‌بندی مقادیر تفکیک می‌کنند و بدین ترتیب، تحلیل همبستگی بین رتبه و میزان بارش ایجاب می‌کند که از ضریب اسپیرمن بهره گرفته شود [۱۸، ۲۸، ۲۹].

بنابراین، ضرایب همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌ها و میزان بارش با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار Matlab محاسبه گردید.

براساس تحلیل نتایج و با توجه به کم‌ترین خطای جذر میانگین مربعات^{۱۴} (RMSE)، روش IDW به‌عنوان روش منتخب برای پیاده‌سازی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های SIAP و PNPI انتخاب گردید.

خشک‌سالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین، گسترده‌ترین و شایع‌ترین بلایای طبیعی در سطح جهانی و به‌ویژه در ایران، شناخته می‌شود.

در این راستا، پایش دقیق و مستمر خشک‌سالی به منظور مدیریت بهینه آن، حائز اهمیت و ضرورت است.

در دهه‌های گذشته، تحلیل خشک‌سالی اغلب به صورت توصیفی انجام می‌گرفت، اما امروزه با هدف ارائه ارزیابی کمی از پدیده خشک‌سالی و پایش آن، از شاخص‌های متنوعی که مبتنی بر داده‌های بارش هستند، استفاده می‌شود.

با توجه به موارد فوق، پژوهش حاضر با هدف پایش خشک‌سالی در استان یزد، از طریق بهره‌گیری از شاخص‌های PNPI و SIAP انجام شده است.

شکل ۳، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های PNPI و SIAP سالانه برای استان یزد در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ را به تصویر می‌کشد.

بررسی اجمالی این نقشه‌ها نشان‌دهنده توافق قابل توجه نتایج حاصل از دو شاخص است، که حاکی از همبستگی بالای بین آن‌ها می‌باشد.

در سال ۲۰۰۰، به‌جز در محدوده جنوب غربی استان (منطقه ایستگاه ابرکوه)، شرایط نرمالی بر استان حاکم بوده است.

در سال ۲۰۰۱، به‌طور تقریبی تمام استان وضعیت ترسالی را تجربه کرده، در حالی که در سال ۲۰۰۲ بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه درگیر خشک‌سالی شده است.

سال ۲۰۰۳ با شرایط نرمال در سراسر استان همراه بوده و وضعیت به تدریج تا سال ۲۰۰۷ بهبود یافته است،

^{۱۴}- Root Mean Squared Error

جدول ۶، مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن به‌دست آمده برای بارش و شاخص‌های PNPI و SIAP در ایستگاه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

جدول ۴- وسعت خشک‌سالی برحسب درصد با استفاده از

تصاویر طبقه‌بندی‌شده SIAP

Table 4. Drought extent in percentage using SIAP classified images

SIAP	<-1.28	-1.28- -0.84	-0.84- -0.52	-0.52- -0.25	-0.25- 0.25	0.25- 0.52	0.52- 0.84	0.84- 1.28	>1.28
2000	0.48	2.65	1.83	1.97	42.7	25.4	19.3	5.50	0.28
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	5.34	7.11	10.1	52.9	24.6
2002	15.2	55.4	15.7	7.82	5.92	0.00	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.46	4.80	21.5	71.4	1.85	0.00	0.00	0.00
2004	0.12	0.98	4.28	5.81	48.5	19.4	10.9	6.63	3.42
2005	0.00	0.00	2.54	4.08	26.4	29.5	20.5	12.2	4.87
2006	1.94	1.59	0.45	3.75	19.2	21.4	31.7	10.7	9.34
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	3.16	12.9	29.4	45.8	8.66
2008	6.98	48.2	35.3	7.92	1.54	0.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.00	0.74	4.78	71.8	18.3	3.87	0.57	0.00
2010	0.00	2.85	44.2	50.5	2.42	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	2.83	6.09	9.45	11.4	14.3	14.9	28.1	12.2	0.79
2012	0.59	0.97	5.87	9.14	17.1	19.5	35.6	10.0	1.22
2013	3.65	70.6	15.3	4.25	4.27	1.70	0.25	0.00	0.00
2014	6.66	54.9	28.1	6.56	3.74	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	9.70	6.75	20.8	22.7	40.0
2016	0.00	0.00	0.00	1.81	12.5	24.8	41.3	11.6	7.97
2017	0.00	2.06	7.14	13.4	64.9	6.18	1.79	2.77	1.75
2018	3.23	7.94	19.6	33.2	33.7	1.88	0.39	0.11	0.00
2019	5.45	73.1	16.8	1.19	3.48	0.00	0.00	0.00	0.00
2020	1.57	72.9	21.9	3.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2021	0.00	0.00	0.23	3.48	8.92	22.9	47.7	15.9	0.73
2022	0.00	0.00	0.00	1.01	19.6	59.6	17.5	1.52	0.81
2023	0.00	0.00	1.00	2.35	13.1	17.4	13.8	22.3	30.1
2024	0.00	4.73	23.2	49.6	17.9	2.82	1.14	0.58	0.00

جدول ۵- وسعت خشک‌سالی برحسب درصد با استفاده از

تصاویر طبقه‌بندی‌شده PNPI

Table 5. Drought extent in percentage using PNPI classified images

PNPI	<40	40- 55	55- 70	70- 80	80- 120	120- 130	130- 145	145- 160	>160
2000	1.29	1.81	1.72	1.16	60.3	22.2	8.90	2.59	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	9.50	6.61	26.0	33.2	24.6
2002	16.6	31.4	32.1	7.27	12.7	0.00	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.45	5.54	94.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.02	1.76	3.09	63.6	13.2	8.70	4.49	5.08
2005	0.00	0.00	2.21	2.81	53.6	21.5	11.8	7.30	0.87
2006	1.32	1.40	0.90	1.94	40.8	21.7	18.4	4.95	8.55
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	12.7	22.2	30.2	26.7	8.18
2008	2.01	19.8	49.6	19.4	9.26	0.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.00	0.00	0.00	0.59	92.6	5.61	1.21	0.00	0.00
2010	0.00	0.00	6.37	47.1	46.6	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	1.67	12.4	21.8	17.7	46.4	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	65.7	32.6	1.63	0.00	0.00
2013	4.02	23.9	53.8	7.41	9.61	1.26	0.00	0.00	0.00
2014	7.45	19.8	50.0	12.7	9.93	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	15.8	10.9	25.4	15.2	32.7
2016	0.00	0.00	0.00	0.00	30.7	33.9	23.1	7.52	4.69
2017	0.00	0.00	3.61	5.59	83.8	1.70	1.40	2.28	1.63
2018	0.82	3.31	10.4	16.4	68.6	0.34	0.23	0.00	0.00
2019	0.00	12.3	81.0	2.25	4.39	0.00	0.00	0.00	0.00
2020	0.00	7.36	79.3	11.8	1.57	0.00	0.00	0.00	0.00
2021	0.00	0.00	0.00	0.00	27.3	23.0	42.7	7.00	0.00
2022	0.00	0.00	0.00	0.00	68.3	27.7	2.49	0.85	0.71
2023	0.00	0.00	0.00	1.33	29.4	10.4	14.4	18.9	25.7
2024	0.00	1.21	13.0	33.6	50.7	0.91	0.56	0.00	0.00

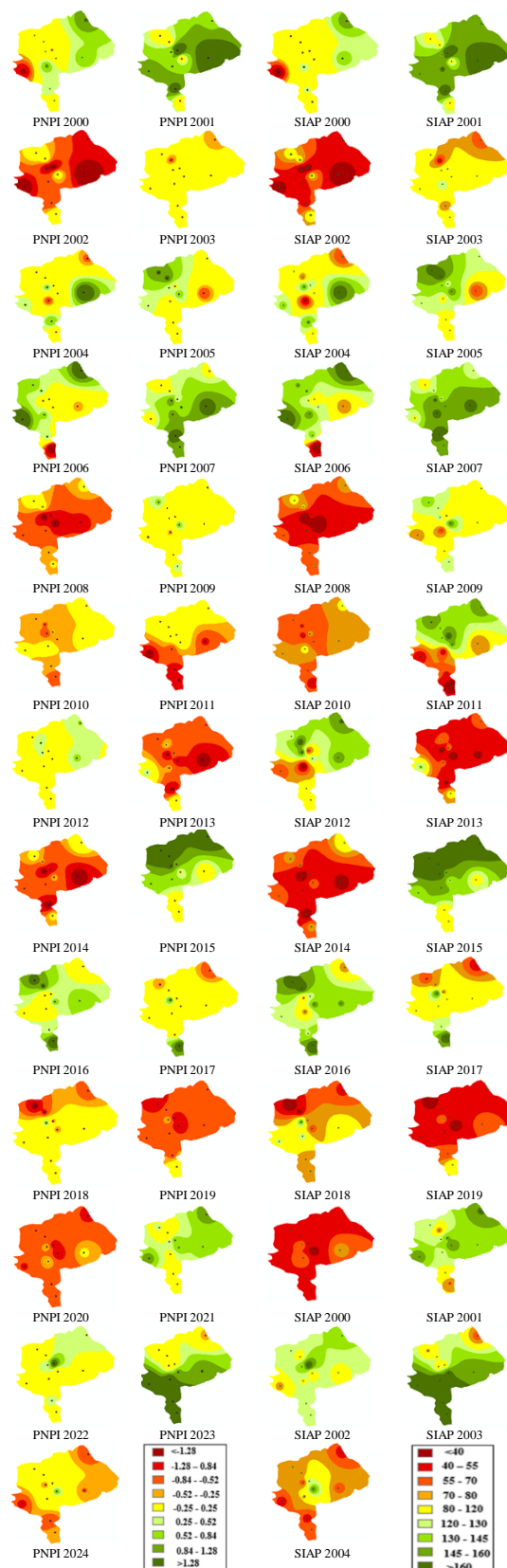


Figure 2. Annual PNPI and SIAP zoning maps of Yazd province (2000-2024)

شکل ۲- نقشه‌های پهنه‌بندی‌شده PNPI و SIAP سالانه استان

یزد (۲۰۰۰-۲۰۲۴)

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

راضیه زارعی محمودآبادی مسئول جمع‌آوری منابع کتابخانه‌ای، داده‌های آماری و انجام بررسی‌های میدانی بود. نویسنده مسئول، تحلیل داده‌ها، تدوین و تفسیر مواد مطالعه را انجام داد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

جدول ۶- مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن بین بارش و

SIAP و PNPI

Table 6. Spearman correlation coefficient values between precipitation and PNPI and SIAP

Station	PNPI	SIAP
Abarkouh	1	0.996
Bahabad	0.981	1
Bafq	1	0.991
Robat	1	1
Aqda	1	1
Gariz	0.977	1
Marvast	0.993	1
Mehriz	1	0.985
Meybod	1	0.968
Herat	0.986	1
Yazd	1	1

مطالعات سلیمی و همکاران در راستای تعیین کارآمدترین شاخص خشک‌سالی برای مناطق اقلیمی ایران، حاکی از آن است که شاخص‌های PNPI و SIAP، در مقایسه با سایر شاخص‌ها، برای مناطق مرکزی کشور از جمله استان یزد، بازنمایی دقیق‌تری از شرایط خشکی ارائه می‌دهند [۳۰]. نتایج پژوهش حاضر و ضریب همبستگی بالای مشاهده‌شده نیز این یافته را تأیید می‌کند.

References

- [1] Fetemi M, Narangifard M. Study of spatial and temporal rain and drought patterns in the south of Iran using TRMM. *Desert*. 2018; 23(2): 243-253 [In Persian].
- [2] Zarei R, Sarajian M, Bazgeer S. Monitoring meteorological drought in Iran using remote sensing and drought indices. *Desert*. 2013; 18: 89-97 [In Persian].
- [3] Sarajian M, Zarei R, Bazgeer SA. A review of literature for drought monitoring and drought indices. In: International Conference on Geospatial Research. 2014 Nov 15–17; Tehran, Iran [In Persian].
- [4] Ghasemi H, Gholami A, Hadarbadi G, Ebrahimi H. Drought monitoring using climatic indices and geostatistic technique (Case Study: Hossein Abad Plain, Sarbisheh, Iran). *Journal of Water Sciences Research*. 2011; 3(1): 37-43 [In Persian].
- [5] Kalhori M, Tadayon M, Kahrizi E, Ghiasvand M. Analysis and monitoring of water resources and drought using a combination of GRACE, MODIS, and Landsat 8 satellite images (Case study: Hamedan City). *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1): 62-74. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11390.1007> [In Persian].
- [6] Wilhite DA. Drought as a natural hazard. In: Diaz-Granados AM, et al., editors. *Drought preparedness and mitigation planning*. Berlin: Springer; 2008. p. 1–18.

- [7] Wilhite DA, Glantz MH. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*. 1985; 10(3): 111–120.
- [8] National Weather Service. Types of Drought [Internet]. NOAA; 2022 [cited 2025 Aug 2]. Available from: <https://www.weather.gov/safety/drought-types>.
- [9] National Integrated Drought Information System (NIDIS). Agriculture and Drought [Internet]. U.S. Government; 2023 [cited 2025 Aug 2]. Available from: <https://www.drought.gov/topics/agriculture>.
- [10] National Drought Mitigation Center. Types of Drought [Internet]. University of Nebraska–Lincoln; 2022 [cited 2025 Aug 2]. Available from: <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx>.
- [11] Global Water Partnership. IDMP: List of Drought Definitions [Internet]. 2021 [cited 2025 Aug 2]. Available from: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_images/idmp-list-definitions.pdf.
- [12] Shyrokaya B. Advances and gaps in the science and practice of impact-based forecasting of droughts. *WIRES Water*. 2024; <https://doi.org/10.1002/wat2.1698>.
- [13] Svoboda M, Le Compte D, Hayes MJ, Heim R, Gleason K, Angel J, Rippey B, Tinker R, Palecki M, Stooksbury D, Miskus D, Steven, S. The drought monitor. *The Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; 83: 1181-1190.
- [14] Palmer WC. Meteorological drought. U.S. Weather Bureau Research Paper No. 45. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce; 1965. Available from: <https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/cdo/documentation/PDSresearchpaper.pdf>.
- [15] Palmer WC. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. *Weatherwise*. 1968; 21: 156–161. <https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>.
- [16] McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*; 1993 Jan 17–22; Anaheim, CA. Boston: American Meteorological Society; 1993. p. 179–184.
- [17] Gibbs WJ, Maher JV. Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin No. 48*. Melbourne: Commonwealth of Australia, Bureau of Meteorology; 1967. Available from: https://www.droughtmanagement.info/literature/UNESCO_rainfall_deciles_as_drought_indicators_1967.pdf.
- [18] Shafer BA, Dezman LE. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: *Proceedings of the Western Snow Conference*; 1982 Apr; Reno, Nevada. Colorado State University; 1982. p. 164–175.
- [19] Ramezani Gourabi B. The zoning of drought with SIAP model in Sapedrud valley, Gilan–Iran, southwestern Caspian Sea. *Journal of American Science*. 2011; 7(2): 346–350. (Standard Index of Annual Precipitation as drought recognition index) papers.ssrn.com+8jofamericanscience.org+8ajbasweb.com+8
- [20] Safarian Zengir V, Salahi B, Maleki Marsht R, Kianian M. Assessing drought using SIAP index in the eastern region of Gilan province. *Bi-Quarterly of Urban Ecology Research*. 2020; 11(1): 121–136.
- [21] Nikbakht J, Tabari H, Talaee PH. Streamflow drought severity analysis by percent of normal index (PNI) in northwest Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 2013; 112(3–4): 565–573. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0752-x>.
- [22] Boroghni M, Taei M, Mirnia SKh. Analyzing the relationship between hydrogeological and climatic droughts in the Sabzevar Plain using indicators SWI and SPI. *The Scientific-Research Quarterly of Iran's Pasture and Desert Research*. 2013; 4(20): 733–744 [In Persian].
- [23] Zarei Mahmoudabadi R, Talebi MS, Sadredini MA. Study of drought situation based on PNPI index in Yazd province. In: *Proceedings of the 8th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*; 2012 Dec; Tehran, Iran.
- [24] World Meteorological Organization (WMO). *Hydrological aspects of drought*. Studies and Reports in Hydrology, No. 39. Geneva: UNESCO-WMO; 2004. 149 p.

- [25] Khalighisigarudi Sh, Sadeghi Sangdehi SA, Ousati Kh, Ghavidel Rahimi Y. Investigating the evaluation profiles of drought and drought phenomena: a case study of Mazandaran province. *The Scientific and Research Quarterly of Pasture and Desert Research in Iran*. 2009; 16(1) [In Persian].
- [26] Izadi N, Khazimenejad H, Yaghoobzade M, Fouladinasrabad M. Investigating the ability of R software to determine drought: case study of South Khorasan province. *Nivar*. 2023; 122: 142–158 [In Persian].
- [27] Bazrafshan J, Khalili A. Spatial analysis of meteorological drought in Iran from 1965 to 2003. *Desert*. 2013; 18: 63–71.
- [28] Vakhshuri A, Jafarpur Z, Kardovani P. Determining the most appropriate index for droughts in the rainy regions of Iran. *Regional Planning Quarterly*. 2017 [In Persian].
- [29] Willeke G, Hosking JRM, Wallis JR, Guttman NB. The National Drought Atlas. Institute for Water Resources Report. U.S. Army Corps of Engineers; 1994.
- [30] Salimi L, Masoumpour J, Mojarad F, Jalilian A. Investigating the possibility of drought and choosing the most appropriate index in the climatic areas of Iran. *Geographical Studies of Dry Areas*. 2023; 14(53): 18-39 [In Persian].