

Evaluation of the effects of drought indicators on water poverty (Case Study: Gorgan Township)

Monireh Liaghi¹ , Khalil Ghorbani^{2*} , Ghorban Ghorbani Nasrabad³ , Meysam Salarijazi² , Fariba Niroumandfard⁴ 

¹ M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³ Assistant Professor, Cotton Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran

⁴ Ph.D. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran

Extended Abstract

Introduction

Water resources are the common aspect of the goals and challenges of sustainable development, the lack of which is one of the big multidimensional problems of the current century and is one of the main reasons for positive and negative developments in the world. Therefore, the water poverty index (WPI) is one of the indices defined for this purpose. This index shows the effect of the combination of effective factors on the scarcity and stress of water resources. It provides the conditions for prioritizing and developing management versions in different regions. To determine water scarcity and poverty in each region, attention should be paid to the conditions of water resources in the studied region, the ability to calculate the index and the existence of information and data in the studied region, as well as the selection of selected criteria and components in that region. In this study, the water poverty index is used to investigate the shortage and tension of water resources and for its influence on drought, its relationship with univariate drought indices based on precipitation including standardized precipitation index (SPI) and Z score index (ZSI), and variable indices based on precipitation and evapotranspiration including standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and reconnaissance drought index (RDI) were searched.

Materials and Methods

The study area in this research is the Hashem-Abad meteorological station in Gorgan Township, and the statistical period for calculating the water poverty index based on the data available in the study area was considered to be 13 years (2003-2015). The water poverty index in this research is calculated based on five main components, which include the resource (groundwater loss), meteorological (temperature and precipitation), consumption (water need), capacity (river discharge), and environmental (salinity). Each of the components must be weighed after calculating to calculate the water poverty index. For this purpose, the AHP hierarchical technique was used. First, a questionnaire was prepared and the components were scored based on the opinion of regional water experts and university professors, then, using Expert Choice software, the weight of the main components of the water poverty index was determined, and finally, the WPI for the study area in this research was also estimated. Then, in the next step, drought indices SPI, SPEI, RDI, and ZSI were calculated in 6-month and 12-month time windows. To calculate the drought indices, the precipitation and temperature data at the Hashem-Abad meteorological station for a period of 30 years (1990-2019) were considered, which were sorted monthly and the coding necessary to calculate the SPI and SPEI indices in time windows 6 and 12 months was done by R programming and statistical software. Also, two indicators, RDI and ZSI, were calculated in the Excel software. Finally, the relationship between drought indices and the water poverty index was searched based on simple one-to-multivariate correlations.

Results and Discussion

The results of the water poverty index's components showed that the resources and environment component had the highest value in 2009 and 2010 and the lowest value in 2010 and 2016, respectively. About meteorological, capacity, and consumption components, the highest values were in the years 2010, 2004, and 2009, respectively, and the lowest values occurred in the years 2010, 2016, and 2016, respectively. Questionnaire analysis of WPI components with AHP showed that resources and environment components had the highest and lowest weights with values of 0.354 and 0.041, respectively. However, by multiplying these weights by their related components, it was found that the components of consumption, environment, resources, meteorology, and capacity had the

greatest effect in calculating the water poverty index. The range of WPI changes during the years (2004-2016) varies from 26 to 82, so 2014, which is one of the driest years, the region was in the poorest state of water resources and the year 2008 had the best conditions. Considering the average WPI of about 55, out of the 13 years studied, the WPI was lower than the average in 8 years. In the next step, due to the lack of data, there was no possibility of non-linear modeling, therefore, simple one-to-multivariate correlations were used. The results of these correlations showed that the use of the multivariate linear regression method by considering the drought index in a 12-month time window along with two six-month time windows related to the first and second half of the year increases their correlation with the water poverty index. Examining the effect of the time window considered for the drought index on the water poverty index shows that the 12-month time window has a higher correlation than the six-month time window. Also, among the six-month time windows, in the SPEI index, the first six months of the year, which includes the spring and summer seasons, had a higher correlation with the water poverty index. Correlation results between drought indices and WPI showed that the annual time interval is more suitable than the 6-month time one. And among the 4 indices studied, the SPEI index with $R^2=0.90$ had the highest correlation while the ZSI index with $R^2=0.81$ had the lowest correlation with WPI.

Conclusion

Based on the results of the components of the water poverty index in this research, it was observed that the consumption component in the Gorgan region had the biggest role in the WPI estimation, so water conservation can have a great contribution to solving water poverty. Due to the high volume of water consumption in the agricultural sector, some measures should be taken to manage water consumption and choose the appropriate cultivation patterns. The high correlation of WPI with drought indices, especially the SPEI variable index, makes the importance of creating a drought monitoring and forecasting system more tangible, and due to global warming and climate change in the future, which this region is not exempt from, it can make the problems of water poverty and lack of water more severe in this region.

Keywords: AHP, Drought index, SPEI, Water poverty index, Water consumption

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the University of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Monireh Liaghi: Writing, original draft preparation, software; **Khalil Ghorbani:** conceptualization, methodology, Resources, software, manuscript editing; supervision **Ghorban Ghorbani Nasrabad:** Formal analysis and review **Meysam Salarijazi:** conceptualization and review, **Fariba Niroumandfard:** Conceptualization, methodology, original draft preparation.

*Corresponding Author, E-mail: ghorbani.khalil@gmail.com

Citation: Ghorbani, K., Liaghi, M., Ghorbani Nasrabad, G., Salarijazi, M., & Niroumandfard, F. (2024). Evaluation of the effects of drought indicators on water poverty (Case study: Gorgan region). *Water and Soil Management and Modelling*, 4(3), 305-320.

DOI: 10.22098/mmws.2023.13144.1316

Received: 26 June 2023, Received in revised form: 29 July 2023, Accepted: 03 August 2023, Published online: 03 August 2023
Water and Soil Management and Modelling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 305-320

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی تأثیرات شاخص‌های خشکسالی بر شاخص فقر آبی (مطالعه موردی: شهرستان گرگان)

منیره لیاقی^۱، خلیل قربانی^{۲*}، قربان قربانی نصرآبادی^۳، میثم سالاری جزی^۴، فریبا نیرومند فرد^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۳ استادیار، مؤسسه تحقیقات پنبه کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
^۴ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و مصرف بی‌رویه سبب شده که فشار بر منابع زیرزمینی افزایش یابد و مناطقی را به سمت خشکی و کاهش شدید منابع آبی سوق دهد. بر این اساس می‌بایست ظرفیت هر منطقه شناسایی شده و تغییرات آن در طول زمان و در شرایط بحرانی آبی مانند وقوع خشکسالی سنجیده شود. برای این منظور، از شاخص فقر آبی (WPI) متشکل از پنج مؤلفه اصلی منابع، هواشناسی، مصرف، ظرفیت و محیط زیست، استفاده شده است. همچنین، برای تحلیل تأثیرپذیری شاخص فقر آبی از خشکسالی، رابطه آن با شاخص‌های خشکسالی تک متغیره مبتنی بر بارش شامل SPI و ZSI و شاخص‌های دو متغیره مبتنی بر بارش و تبخیر-تعرق شامل SPEI و RDI استفاده شد. این مطالعه در طی دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۸۳ در شهرستان گرگان انجام شد. جهت محاسبه مؤلفه‌های شاخص فقر آبی از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی به مؤلفه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد مؤلفه منابع و محیط زیست به ترتیب با مقادیر ۰/۳۵۴ و ۰/۰۴۱ بیش‌ترین و کم‌ترین وزن را به خود اختصاص دادند. اما با ضرب کردن این وزن‌ها در مؤلفه‌های مرتبط آن مشخص شد به ترتیب مؤلفه‌های مصرف، محیط زیست، منابع، هواشناسی و ظرفیت بیش‌ترین تأثیر را در محاسبه شاخص فقر آبی داشتند. با در نظر گرفتن میانگین WPI حدود ۵۵، از ۱۳ سال مورد مطالعه در هشت سال آن WPI پایین‌تر از میانگین دیده شد. نتایج همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی با WPI نشان داد پنجره زمانی سالانه مناسب‌تر از پنجره زمانی شش ماهه است و از بین چهار شاخص مورد مطالعه شاخص SPEI با $R^2 = ۰/۹$ بیش‌ترین همبستگی و شاخص ZSI با $R^2 = ۰/۸۱$ کم‌ترین همبستگی را با WPI داشت. در نهایت، نتایج حاصل از شاخص فقر آبی نشان داد که مؤلفه مصرف در منطقه مطالعاتی بیش‌ترین نقش را در ایجاد WPI دارد. بنابراین، با توجه به حجم بالای مصرف آب در بخش کشاورزی می‌بایست تمهیداتی را برای مدیریت مصرف آب و انتخاب الگوی کشت مناسب اندیشید. همچنین، همبستگی بالای WPI با شاخص‌های خشکسالی به‌ویژه شاخص دو متغیره SPEI اهمیت لزوم ایجاد سامانه‌های پایش و پیش‌بینی خشکسالی را ملموس‌تر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شاخص فقر آبی، شاخص خشکسالی، مصرف آب، AHP، SPEI

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghorbani.khalil@gmail.com

استناد: قربانی، خلیل، لیاقی، منیره، قربانی نصرآبادی، قربان، سالاری جزی، میثم، و نیرومند فرد، فریبا (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیرات شاخص‌های خشکسالی بر شاخص فقر آبی (مطالعه موردی: شهرستان گرگان). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۳۰۵-۳۲۰.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13144.1316

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۳۰۵ تا ۳۲۰

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

بروز خشکسالی‌های پی‌درپی همراه با شدت‌های متفاوت، استفاده نامناسب از منابع آب در دسترس، اعم از منابع آب سطحی و زیرسطحی سبب بروز چالش‌های مختلفی در زمینه مدیریت عرضه و تقاضای آب و نیز توسعه عادلانه و حفاظت از محیط زیست شده است (Farsani et al., 2019; Givati et al., 2019; Nosrati et al., 2019). در این راستا، Zarei et al. (2019) مهم‌ترین و بزرگ‌ترین چالش و بحران‌های حال حاضر را موضوع کمبود آب و چالش‌های ناشی از آن معرفی کردند. شاخص‌های خشکسالی شامل روش‌های تحلیل و پایش خشکسالی هستند که از جمله شاخص‌های خشکسالی می‌توان به شاخص^۱ RDI که توسط McKee et al. (2007)، شاخص^۲ SPI که توسط Edwards and McKee (1997) و نیز شاخص^۳ SPEI که توسط Vicente-Serrano et al. (2010) ارائه شده است اشاره نمود. در تحقیقی، Rezaei Ghaleh and Ghorbani, (2018) به تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که شاخص SPEI دوره طولانی‌تری از خشکسالی و ترسالی و شاخص SPI وقایع حدی بزرگ‌تری را نسبت به SPEI نشان می‌دهد. در تحقیق دیگری، Morid et al. (2006) برای پایش خشکسالی در تهران عملکرد هفت شاخص را مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد شاخص‌های SPI و CZI و Z_SCORE در تشخیص خشکسالی دارای عملکرد مشابهی هستند و نسبت به تشخیص زمان آغاز خشکسالی عکس‌العمل کندی را نشان می‌دهند. در ادامه، Nazarifar and Salari (2013) ریسک خشکسالی را با استفاده از شاخص SPI در حوضه کرخه ارزیابی و پهنه‌بندی کرده و نشان دادند نواحی پیرامون حوضه، مخصوصاً نواحی شمال غربی، شمال، شمال شرقی و بخش‌های کمی از نواحی شرقی و جنوب شرقی، مستعدترین مناطق تحت تأثیر خشکسالی هستند و با افزایش دوره‌های بازگشت میزان شدت ریسک خشکسالی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای Jahangir et al. (2022) به پایش خشکسالی برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی و ۱۰ ایستگاه هیدرومتری در غرب حوضه آبریز ارومیه با توابع توزیع مختلف جهت شناسایی بهترین تابع توزیع برای برازش داده‌ها پرداختند. عملکرد تطبیقی دو شاخص SPI و SSI نشان داد که این دو شاخص با یک‌دیگر رابطه مستقیم دارند. همچنین، مشخص شد که شاخص SPI برای پیش‌بینی شروع خشکسالی و شاخص SSI برای سنجش شدت و تداوم خشکسالی بهتر هستند. تغییرات زمانی خشکسالی هواشناسی-هیدروبوژیکی

در استان گیلان با استفاده از شاخص SPI و SDI نیز توسط Janbozorgi et al. (2021) مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه نتایج نشان داد شاخص SPI رو به ترسالی است و مقدار شاخص SDI در اکثر ایستگاه‌های استان فاقد خشکسالی و یا دارای خشکسالی متوسط هستند.

از سایر مطالعات انجام شده، Zhang et al. (2012) به‌کارگیری شاخص فقر آبی به ارزیابی میان تنش آبی حوضه رودخانه شیانگ در چین پرداختند. نتایج نشان داد که منطقه مین-کین با مقدار شاخص فقر آبی ۲۶/۳ از وضعیت مناسبی برخوردار نیست، اما منطقه جینگ چانگ با ارزش نهایی ۶۶/۹ برای شاخص فقر آبی دارای وضعیت نسبی بهتری است. در استان فارس Zarei and Moghimi (2019) نسخه اصلاح شده‌ای از شاخص SPEI را با استفاده از سری داده‌های پنج ایستگاه هواشناسی ارائه دادند. در شمال شرق چین Ye et al. (2019) با استفاده از شاخص SPEI وضعیت مکانی و زمانی خشکسالی را بررسی کردند. همچنین، Wurtz et al. (2019) بیان کردند که در ارزیابی وضعیت منابع آب جهت کمک به مدیریت مناسب آن نیز تاکنون شاخص‌های علمی و چندمعیاری مختلفی از جمله شاخص فالکن مارک، شاخص سازمان ملل، شاخص امنیت آب و شاخص فقر آبی ارائه شده است. شاخص فقر آبی ابعاد مختلف تأثیرگذار بر مدیریت و توسعه منابع آبی را مدنظر قرار می‌دهد و به‌عنوان ابزاری جامع موجودیت منابع آب و ارتباط آن را با نیازهای انسان و محیط زیست را تحلیل می‌کند. در استان گلستان Ghorbani (2019) با استفاده از تحلیل مکانی-زمانی نوسانات تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌های عمیق و نیمه‌عمیق را بررسی نمود. نتایج ایشان نشان داد در اکثر مناطق، سطح آبخوان عمیق روند کاهشی دارد و آبخوان‌های نیمه‌عمیق علاوه بر روند کاهشی از روند افزایشی هم برخوردارند. همچنین، ایشان بیان کرده که کاهش تغییرات آبخوان‌های عمیق نسبت به نیمه‌عمیق بیش‌تر است و دلیل آن برداشت‌های بی‌رویه می‌باشد. در شهرستان قم، Talebi and Amini (2019) ابعاد کم‌آبی را با استفاده از شاخص فقر آبی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه از نظر فقر آبی پایین‌ترین رتبه و منطقه جعفرآباد بالاترین رتبه را دارند و تمامی بخش‌ها از نظر ظرفیت انسانی وضعیت مناسبی داشتند. در حوضه‌های آبریز اردبیل نیز Asiabi Hir et al. (2018) جهت مدیریت منابع آب از شاخص فقر آبی با پنج مؤلفه اصلی منابع، ظرفیت، دسترسی، مصارف و محیط زیست استفاده کردند. در نهایت، Yazdi et al. (2021) به بررسی اثر تغییر اقلیم و خشکسالی بر شاخص فقر آبی در دشت فسا پرداختند. نتایج آن‌ها

³ Standardized precipitation evapotranspiration index

¹ Reconnaissance drought index

² Standardized precipitation index

و ضرورت بررسی یک منطقه از جهت محدودیت‌هایی که باعث ایجاد فقر آبی می‌شود در این تحقیق به بررسی ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی با شاخص فقر آبی پرداخته شد که از جمله نوآوری این تحقیق است. نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت بهتر منابع آب در منطقه مورد مطالعه مؤثر واقع شود.

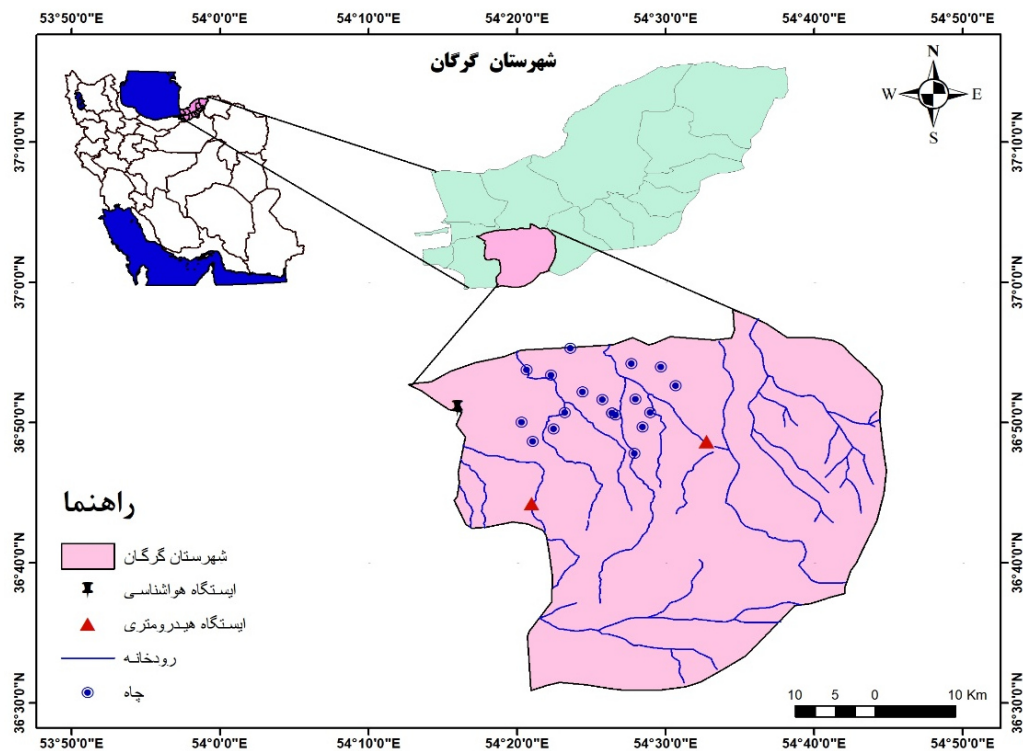
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در این تحقیق شهرستان گرگان است و ایستگاه هواشناسی نیز ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد است که ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۱۳ متر، متوسط دمای هوا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه ۵۴۰ میلی‌متر است. شهرستان گرگان از لحاظ آب و هوایی به ترتیب در طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن و آمبرژه دارای اقلیم مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب است (Barakhanpour et al., 2021). در ادامه، موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

نشان داد که در کوتاه‌مدت وابستگی شاخص فقر آبی در دشت فسا به تغییرات خشکسالی در مقایسه با تغییرات اقلیمی بیش‌تر بوده و جهت مقابله با فقر آبی در دشت فسا مدیریت مصارف آب در این دشت به‌ویژه در شرایط خشکسالی بسیار ضروری است.

با توجه به مطالعات انجام شده، مشاهده می‌شود تاکنون تأثیر شاخص‌های خشکسالی بر شاخص فقر آبی در منطقه گرگان بررسی نشده است لذا در این تحقیق به بررسی اثر شاخص‌های خشکسالی بر شاخص فقر آبی پرداخته خواهد شد. با بررسی سوابق تحقیق در خصوص بررسی و تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخصهای مختلف مشخص می‌شود که علیرغم سوابق متعدد در استفاده از شاخص SPI، مطالعات محدودی در استفاده توأمان از شاخص‌های تک متغیره و دو متغیره انجام گرفته است. همچنین، مشاهده می‌شود در تحقیقات انجام شده در زمینه شاخص فقر آبی، تحقیقی که ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی تک متغیره و دو متغیره با شاخص فقر آبی را بررسی کند انجام نشده است. لذا بر اساس اهمیت خشکسالی



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study area

داده‌های موجود در مقیاس سالانه تهیه شدند، استفاده شد. علاوه‌براین، اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت نیز از طریق سازمان جهاد کشاورزی به‌دست آمد. در جدول ۱ خلاصه آماری داده‌های مورد نیاز آورده شده است.

۲-۲- داده‌های مورد نیاز

در این تحقیق به دو دسته داده نیاز است: داده‌های هواشناسی که از سازمان هواشناسی و داده‌های دبی رودخانه (جدول ۱)، تراز سفره آب زیرزمینی و متغیرهای کیفی آن‌ها که از شرکت آب منطقه‌ای استان طی دوره ۱۳ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۳) بر اساس

جدول ۱- خلاصه آماری داده‌های مورد استفاده در طی سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۹۵

Table 1- Statistical summary of the data used during the years 2004-2016

انحراف معیار	میانگین	حداقل	حداکثر	واحد	داده‌های آماری
0.11	0.03	-0.13	0.22	متر	افت آب‌زیرزمینی
65.46	834.15	756	979	میکروموس	شوری
0.60	18.22	17.07	19.20	درجه سانتی‌گراد	دما
124	514	345	710	میلی‌متر	بارش
29.01	35.86	0.98	94.50	مترمکعب برانابه	دبی

۲-۳- محاسبه شاخص فقر آبی

شاخص فقر آبی به‌عنوان شاخصی کل‌نگر، از سویی مباحث منابع آب را پوشش داده و از سوی دیگر ابعاد برنامه‌ای و توسعه‌ای کم‌آبی را مدنظر قرار می‌دهد (Talebi and Amini, 2019). شاخص فقر آب از پنج مؤلفه به شرح زیر تشکیل شده است:

۲-۳-۱- مؤلفه منابع

این مؤلفه به ارزیابی میزان تخلیه سالانه آب‌های زیرزمینی از چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد. جهت محاسبه این مؤلفه از داده‌های برداشت آب زیرزمینی از ۱۱ چاه موجود در منطقه مطالعاتی (اطلاعات کمی چاه‌های منطقه شامل افت آب‌زیرزمینی) استفاده شده است که طبق رابطه (۱) استاندارد شدند.

۲-۳-۲- مؤلفه هواشناسی

ایستگاه شاخص در این منطقه، ایستگاه هواشناسی سینوپتیک هاشم‌آباد است. بر اساس داده‌های بارش و دما در این ایستگاه مؤلفه هواشناسی طبق رابطه (۱) استانداردسازی و محاسبه شد.

۲-۳-۳- مؤلفه ظرفیت

مؤلفه ظرفیت بیان‌گر توانایی و کارایی سامانه منابع آب سطحی است. در محاسبه این مؤلفه مقدار دبی رودخانه در نظر گرفته می‌شود که برای این منظور از دو رودخانه، یکی شصت کلاته و دیگری خروجی سد نومل واقع در منطقه مورد مطالعه، میانگین‌گیری و سپس با رابطه (۱) استانداردسازی و محاسبه شد.

۲-۳-۴- مؤلفه مصرف

در محاسبه مؤلفه مصرف باید میزان آب مورد استفاده در بخش‌های کشاورزی، در تحلیل‌ها وارد شود. بنابراین، در این مطالعه از نیاز آبی کشت غالب سالانه در منطقه مطالعاتی استفاده شده است. نیاز آبی را میزان آب مورد نیاز گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری به‌منظور تأمین حداکثر رشد و تحویل حداکثر محصول و اطلاع از مقدار کل آب مصرفی و در نتیجه تعیین ظرفیت کانال‌ها و مخازن آب مهم‌ترین مرحله مطالعاتی را در یک طرح آبیاری و زهکشی تشکیل می‌دهد (Mojarrad et al. 2007). برای محاسبه نیاز آبی از مدل واسنجی شده آب و هوا و محصول SSM

برای سه محصول غالب پنبه، سویا و برنج استفاده شد. پس از لحاظ کردن سطح زیرکشت آن‌ها مقدار نیاز آبی سالانه محاسبه و بر اساس رابطه استانداردسازی، این مؤلفه نیز محاسبه شد.

۲-۳-۵- مؤلفه محیط زیست

با توجه به این‌که بقای سامانه‌های محیط زیستی یکی از پیش‌نیازهای توسعه پایدار است در این تحقیق محاسبه شاخص فقر آبی، مؤلفه محیط زیست مدنظر قرار گرفت. زیرا یکپارچگی محیطی موجب افزایش ظرفیت غلبه بر تنش‌های ناشی از کم‌آبی و تداوم منافع اقتصادی کالاها و خدمات اکوسیستم‌ها خواهد شد (Sullivan et al., 2003). جهت محاسبه مؤلفه محیط زیست از داده‌های میانگین سالانه شوری چاه‌های موجود در منطقه استفاده شد و از طریق رابطه (۱) استانداردسازی شد.

بدیهی است که مؤلفه‌ها در واحدها و مقیاس‌های مختلفی هستند. بنابراین، هر کدام از متغیرها باید در ابتدا نرمال شده تا قابل مقایسه شوند. برای این منظور در این مطالعه وزن‌های یکسان برای مؤلفه‌ها انتخاب خواهد شد که دلیل آن هم تفاوت موجود در مناطق مورد مطالعه در استان و ویژگی‌های اقلیمی مختلف هر یک از مناطق است. در نهایت، برای این‌که مقایسه بخش‌های مختلف اجزاء و محاسبه شاخص فقر آبی نسبت به عوامل اقلیمی وجود داشته باشد با توجه به متفاوت بودن واحدهای متغیرهای شاخص هر یک از اجزاء به کمک رابطه (۱) نرمال می‌شوند.

$$CN = \frac{(C - C_{min})}{C_{max} - C_{min}} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه بالا، CN مؤلفه نرمال شده، C مقدار مؤلفه، C_{min} و C_{max} به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار مؤلفه را نشان می‌دهند. بنابراین، داده‌ها بدون واحد و با مقادیر خود بین صفر تا ۱۰۰ نرمال می‌شوند. پس از نرمال‌سازی هر یک از متغیرهای اشاره شده، ابتدا متوسط آن‌ها محاسبه می‌شود که بیان‌گر مقدار هر مؤلفه است. سپس با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی مقدار شاخص فقر آبی در اقلیم‌های مختلف محاسبه می‌شود. وزن هر مؤلفه با استفاده از پرسش‌نامه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به‌دست خواهد آمد. پرسش‌نامه‌ها توسط کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای و اساتید دانشگاه امتیازدهی شدند و با استفاده از نرم‌افزار Expert

بارندگی برای هر مقیاس زمانی است. برای محاسبه شاخص SPI فقط از داده‌های بارندگی ماهانه استفاده می‌شود و برای تشخیص کمبود بارندگی در بازه‌های زمانی (سه، شش، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) طراحی شده است و محاسبه آن شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی کل برای یک ایستگاه معین است. در مرحله بعد متغیرهای توزیع گاما در هر مقیاس زمانی محاسبه شده و تابع احتمال تجمعی آن برای هر ماه رسم می‌شود. در نهایت، از تغییر شکل هم احتمال تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال Z برای محاسبه شاخص خشکسالی SPI استفاده می‌شود (Rezaei Ghaleh and Ghorbani, 2018).

۲-۴-۲- شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده (SPEI)
شاخص خشکسالی SPEI ابتدا توسط Vicente-Serrano et al. (2010) ارائه شده است. این شاخص با استفاده از بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) و به پایش خشکسالی می‌پردازد. جهت محاسبه این شاخص نیاز به محاسبه تبخیر-تعرق است. یکی از روش‌های ساده اندازه‌گیری تبخیر-تعرق روش هارگریوز-سامانی است که مبتنی بر دما است (Hargreaves and Samani, 1985). سپس اختلاف تبخیر-تعرق ماهانه و بارش را برآورد و این مقادیر در دوره‌های مورد نظر با هم جمع می‌شود.

$$D = P_i - PET_i \quad (4)$$

$$D_{nh} = \sum_{i=0}^{n-1} P_{n-1} - PET_{n-1} \quad (5)$$

در روابط فوق، D اختلاف بین مقادیر بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل است. H دوره زمانی مورد بررسی و n بیانگر ماه مورد نظر است. تابع چگالی احتمال لوگ لجستیک سه متغیر مقادیر منفی را در نظر می‌گیرد و به مقادیر Dh برازش داده می‌شود.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \frac{x - \gamma}{\alpha} \right]^{\beta-2} \quad (6)$$

α ، β و γ به ترتیب بیانگر مقیاس شکل، تمایل مرکزی برای مقادیر D ($\gamma < Dh < \infty$) می‌باشند (Bani Mahd and Khalili, 2012). جهت محاسبه متغیر توزیع لوگ لجستیک از روش سریع و ساده گشتاور L استفاده می‌شود (Ahmad et al., 1988). برای محاسبه گشتاورهای L، متغیرهای توزیع پیرسون نوع سوم بر اساس رابطه‌های (7) تا (10) به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{(2W_1 - W_0)}{(6W_1 - W_0 - W_2)} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{(W_0 - 2W_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})} \quad (8)$$

$$\gamma = W_0 - \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta}) \quad (9)$$

$$F(x) = \left[\left(1 + \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (10)$$

Choice وزن‌دهی مؤلفه‌ها انجام شد. رابطه شاخص فقر آبی به صورت زیر است (Salami and Taheri Rikande, 2018):

$$WPI = \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i}{\sum_{i=1}^N w_i} N = 1, \dots, 5 \quad (2)$$

در این رابطه، WPI مقدار شاخص فقر آبی برای هر منطقه، X ارزش مؤلفه‌ها، w وزن هر مؤلفه است. با توجه به پنج مؤلفه اشاره شده در بالا شاخص فقر آبی به صورت زیر به دست می‌آید (Salami and Taheri Rikande, 2018):

$$WPI = \frac{(w_r R + w_m M + w_c C + w_u U + w_e E)}{w_r + w_m + w_c + w_u + w_e} \quad (3)$$

در رابطه فوق مؤلفه‌های منابع، هواشناسی، ظرفیت، مصرف و محیط زیست به ترتیب با R، M، C، U و E نشان داده شده است. شاخص فقر آبی به دست آمده در بالا که متوسط وزنی پنج مؤلفه اشاره شده است، عددی بین صفر تا صد دارد که عدد بزرگ‌تر بیانگر وضعیت مناسب‌تر منطقه مربوطه است. با توجه به این که مقادیر اُفت آب‌زیرزمینی، نیاز آبی، دما و شوری بر شاخص فقر آبی تأثیر منفی دارد بنابراین، برای نشان دادن تأثیر آن بر شاخص، مقادیر آن‌ها از مقدار ۱۰۰ کم شدند و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند (Kazemnezhad et al., 2019).

۲-۴-۳- شاخص خشکسالی

شاخص‌های خشکسالی تشدید بحران آب در سال‌های آینده با توجه به افزایش جمعیت، افزایش آلودگی‌ها، تخریب پوشش گیاهی، تغییر اقلیم و بروز خشکسالی‌ها اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (Asiabi-Hir et al., 2015). از آن‌جا که خشکسالی، رخداد طبیعی و مکرر در وضعیت آب و هواست و تقریباً در تمام رژیم‌های اقلیمی رخ می‌دهد، عمدتاً تأثیرات منفی گسترده‌ای در بیش‌تر مناطق کره زمین را منجر می‌شود (Pan et al., 2014). بنابراین، پایش مستمر تغییرات شرایط آب و هوایی هر منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است هرچند پایش خشکسالی با توجه به شدت آن و ابعاد پیچیده مکانی، چالش‌برانگیز است. خشکسالی رخداد طبیعی است که تأثیر قابل توجهی در کشاورزی، اقتصاد و در ابعاد مختلف زندگی مردم مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (Avazpour et al., 2021). در این تحقیق از چهار شاخص خشکسالی SPI، SPEI، RDI، ZSI به شرح زیر استفاده شد:

۲-۴-۱- شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI)

این شاخص بر اساس اختلاف بین مقادیر بارش و میانگین بارش در یک دوره زمانی مشخص و تقسیم آن بر انحراف معیار بارش به دست می‌آید که ابتدا توسط Mckee et al. (1993) معرفی شد. محاسبات شاخص بارش استاندارد بر اساس احتمالات وقوع

$$ZSI = \frac{P_i - \bar{p}}{SD} \quad (14)$$

در آن بارندگی سال i و SD انحراف معیار بارش در طول دوره آماری، P میانگین بارندگی بلندمدت است. در جدول ۳ طبقات مختلف شاخص مورد بررسی آورده شده است.

جدول ۳- طبقه‌های خشکسالی بر اساس شاخص ZSI

مقدار عددی شاخص	طبقه خشکسالی و ترسالی
$Index \geq 1.5$	ترسالی بسیار شدید
$0.5 \leq Index < 1.5$	ترسالی شدید
$0 \leq Index < 0.5$	ترسالی متوسط
$-0.5 \leq Index < 0$	خشکسالی متوسط
$-0.5 \leq Index < -1.5$	خشکسالی شدید
$Index \leq -1.5$	خشکسالی بسیار شدید

داده‌های بارش و دمای ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد در این تحقیق در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۹) بوده است که به‌صورت ماهانه به فرمت مناسب در نرم‌افزار R قرار گرفت. کدنویسی لازم برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی شش ماهه و ۱۲ ماهه با استفاده از نرم‌افزار آماری و برنامه‌نویسی R انجام گرفت. با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار برنامه‌نویسی R مقادیر SPI و SPEI شش ماهه و ۱۲ ماهه محاسبه شدند. همچنین، مقادیر شش ماهه و ۱۲ ماهه Z و RDI نیز در محیط اکسل به‌دست آمدند. جهت ایجاد رابطه همبستگی بین شاخص فقر آبی سالانه با شاخص‌های خشکسالی، مقادیر شاخص‌ها به‌صورت سالانه انتخاب شدند. به گونه‌ای که از مقادیر SPI شش ماهه، شهریور ماه به‌عنوان شش ماهه اول و اسفند ماه به‌عنوان شش ماهه دوم در سال انتخاب شدند و برای پنجره زمانی ۱۲ ماهه از مقادیر SPI ۱۲ ماهه محاسبه شده توسط مدل R اسفند ماه برای هر سال انتخاب شد و سپس با مقادیر سالانه شاخص فقر آبی در سال‌های آماری مشترک رابطه همبستگی برقرار شد. به همین ترتیب برای بقیه شاخص‌های SPEI، Z و RDI مقادیر شش ماهه اول و دوم و ۱۲ ماهه برای هر سال انتخاب شدند و رابطه همبستگی بین آن‌ها و شاخص فقر آبی برقرار شد و در نهایت نتایج نشان داد شاخص خشکسالی SPEI 12 بیش‌ترین همبستگی را با شاخص فقر آبی دارد.

۲-۵- معیارهای ارزیابی

به‌منظور مقایسه تأثیر شاخص‌های خشکسالی SPI، SPEI، RDI و ZSI بر شاخص فقر آبی در این تحقیق از سه معیار ارزیابی خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای انحرافی (MBE) و ضریب همبستگی (R^2) استفاده شد. رابطه‌های سه معیار ارزیابی استفاده شده به‌صورت زیر است:

در نهایت، مقادیر $F(x)$ از طریق روش تقریبی کلاسیک آمبراموتز-استگان به Z نرمال تبدیل می‌شود و شاخص spei به‌دست می‌آید (Abramowitz and Stegun, 1965).

۲-۴-۳- شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

این شاخص بر اساس دو متغیر بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل عمل می‌کند. محاسبه شاخص با استفاده از روابط زیر انجام (Tsakiris, 2004) و در ابتدا برای هر سال (i) از دوره آماری مورد بررسی مقداری با عنوان a_0 محاسبه می‌شود.

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}} \quad i = 1(1)N \text{ and } = 1(1)12 \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، P بارندگی، ET تبخیر-تعرق پتانسیل در i امین ماه سال i و مقدار i از یک تا N (تعداد سال‌هایی که آمار آن در دسترس است) تغییر خواهد کرد. اگر بارندگی و تبخیر-تعرق به‌صورت سالانه محاسبه شوند به جمع‌کردن مقادیر ماهانه در رابطه نیازی نیست. گام بعدی تعیین شاخص با عنوان RDI به‌نجار (RDI_n) هر سال است که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_0^{(i)}}{\bar{a}} - 1 \quad (12)$$

در این رابطه \bar{a}_0 میانگین حسابی اعداد a_0 هر سال است. جهت محاسبه شاخص معیار شده RDI (RDI_n) از مقادیر سالانه a_0 لگاریتم گرفته که عددی با عنوان y_i به‌دست می‌آید. این شاخص می‌تواند با در نظر گرفتن مقیاس‌های مختلف زمانی و به‌صورت سالانه وضعیت خشکسالی را پایش کند. مقادیر طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی برای شاخص‌های SPI، SPEI و RDI در جدول ۲ ارائه شده است.

$$RDI_{st(k)}^i = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\sigma_{y_k}} \quad (13)$$

جدول ۲- طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی بر اساس

شاخص‌های SPI، SPEI و RDI

Table 2- Different classes of drought intensity based on SPI, SPEI, and RDI indices

مقدار عددی شاخص	طبقه خشکسالی و ترسالی
$Index \geq 2.0$	ترسالی بسیار شدید
$1.5 \leq Index < 2.0$	ترسالی شدید
$1.0 \leq Index < 1.5$	ترسالی متوسط
$-0.99 \leq Index \leq 0.99$	نرمال
$-1.5 < Index \leq 1.0$	خشکسالی متوسط
$-2.0 \leq Index \leq -1.5$	خشکسالی شدید
$Index \leq -2.0$	خشکسالی بسیار شدید

۲-۴-۴- شاخص ZSI (Z-Score)

بر اساس این شاخص انحراف از میانگین نسبت به انحراف معیار داده‌های آماری به‌دست می‌آید و رابطه آن به‌صورت زیر است.

است. در رابطه با مؤلفه‌های هواشناسی، ظرفیت و مصرف به‌ترتیب بیش‌ترین مقادیر مربوط به سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۸۴ و ۱۳۸۸ بوده و کم‌ترین مقدار مؤلفه‌ها به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ رخ داده است. به نظر می‌رسد نوسانات موجود در مؤلفه‌های WPI طی سال‌های مختلف به‌شدت به تغییرپذیری متغیرهای مؤثر در مؤلفه‌های شاخص فقر آبی در کوتاه‌مدت وابسته باشد، به‌طوری‌که به‌عنوان نمونه در مؤلفه منابع به‌دلیل تغییرات زیاد افت آب‌زیرزمینی این مؤلفه در سال‌های مختلف دارای تغییرات زیادی است. شکل ۲ وضعیت پنج مؤلفه شاخص فقر آبی را در منطقه مطالعاتی طی دوره آماری ۱۳ سال را به‌طور میانگین نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، به‌ترتیب مؤلفه‌های مصرف، محیط زیست، منابع، هواشناسی و ظرفیت بیش‌ترین ضریب تأثیر را بر میزان شاخص فقر آبی در منطقه مورد مطالعه، دارند. بنابراین، در منطقه مورد مطالعه برای کاهش میزان فقر آبی نیاز است که به سه مؤلفه مصرف، محیط زیست و منابع توجه بیش‌تری شود تا منطقه از نظر فقر آبی بتواند از شرایط بحرانی به شرایط مطلوب برسد. همچنین، می‌توان با تمرکز بر این سه مؤلفه که بیش‌ترین تأثیر را بر ایجاد شاخص فقر آبی در منطقه مورد مطالعه داشته است منجر به بهبود سریع‌تر فقر آبی شود. لذا، می‌توان با به‌کارگیری فناوری‌های نوین و روش‌های پیشرفته آبیاری از اتلاف منابع آبی جلوگیری نمود تا از این طریق با بهبود زیرساخت‌های عرضه منابع آب، منابع آبی محدود در اختیار مصرف‌کنندگان قرار داده شود. نتایج تحقیق حاضر با نتایج مطالعه Yazdi et al. (2021) هم‌سو است. آن‌ها بیان کردند بدترین وضعیت شاخص فقر آبی در دشت فسا در سال ۱۳۹۳ رخ داده و وابستگی شاخص فقر آبی به تغییرات خشکسالی نسبت به تغییرات اقلیمی بیش‌تر است و شاخص فقر آبی با شاخص خشکسالی SPEI همبستگی بالایی دارد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i) \quad (16)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{[[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]^{0.5}} \quad (17)$$

در روابط فوق n تعداد کل مشاهدات، مقدار محاسباتی، X_i مقدر مشاهداتی، \bar{X} ، \bar{Y} نیز به‌ترتیب میانگین داده‌های محاسباتی و میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشند. بهترین میزان برای RMSE و MBE صفر است و برای ضریب همبستگی R^2 ، نیز مقدار یک است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مؤلفه‌های شاخص فقر آبی

با توجه به توسعه و گسترش روش‌هایی که با استفاده از آن‌ها بتوان بررسی مستمر و درستی از شرایط منطقه مورد مطالعه از نظر منابع آب، نیاز آبی و کیفیت آب ارائه داد و دید جامع‌نگری نسبت به منابع آب و توسعه پایدار منطقه داشت، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، در این تحقیق با هدف بررسی منطقه مورد مطالعه از نظر محدودیت‌های منابع آب از شاخص فقر آبی استفاده شده است که نتایج آن در زیر بیان شده است. نتایج حاصل از محاسبه مؤلفه‌های شاخص فقر آبی طی سال‌های آماری ۱۳۸۳ الی ۱۳۹۵ در جدول ۴ نشان داده شده است. دامنه تغییرات این شاخص از نظر مقدار، بین صفر تا صد استاندارد شده است. بنابراین، در این شاخص مقدار صفر بیان‌گر وضعیت بحرانی و مقدار ۱۰۰ نشان‌دهنده وضعیت مطلوب منابع آب است. نتایج محاسبه شاخص فقر آبی نشان می‌دهد که مؤلفه منابع و محیط زیست به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ بیش‌ترین مقدار و در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۵ کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده مؤلفه‌های شاخص فقر آبی در طی سال‌های (۱۳۸۳-۱۳۹۵)

Table 4- Calculated values of the components of the water poverty index during the years (2004-2016)

سال	مؤلفه مؤلفه‌های شاخص فقر آبی					شاخص فقر آبی
	مؤلفه منابع	مؤلفه هواشناسی	مؤلفه ظرفیت	مؤلفه مصرف	مؤلفه محیط زیست	
1383	66.83	75.06	83.96	86.93	71.07	76.17
1384	80.39	51.88	94.50	84.29	69.05	80.56
1385	33.01	39.39	22.40	75.98	68.60	42.45
1386	20.23	47.96	35.11	74.42	82.73	41.48
1387	53.73	27.00	7.63	92.10	89.23	50.49
1388	100	68.18	36.95	95.15	94.84	81.07
1389	0	5.24	30.67	74.04	100	28.23
1390	94.61	100	5.63	94.09	88.11	75.11
1391	83.53	39.48	42.5	77.53	69.05	67.40
1392	34.78	34.59	59.02	80.33	41.92	50.44
1393	12.19	16.95	0.98	77.93	43.04	26.09
1394	61.62	38.18	10.67	58.50	26.68	45.34
1395	64.63	55.79	36.08	47.98	0	50.66



شکل ۲- وضعیت منطقه مورد مطالعه از نظر مؤلفه‌های شاخص فقر آبی

Figure 2- The Situation of the studied area in terms of water poverty index components

۵۵/۰۴ است که در طی این دوره مشاهده شد، هشت سال مقدار فقر آبی پایین‌تر از میزان میانگین شاخص فقر آبی است و منطقه از لحاظ منابع آب در شرایط نامطلوبی قرار دارد.

جدول ۶- مقادیر ارزیابی آماری مقادیر شاخص فقر آبی در طی دوره آماری ۱۳۸۳-۱۳۹۵

Table 6-Statistical assessment of water poverty index values during the statistical period 2004-2016

مقادیر	متغیرهای آماری
55.04	میانگین
19.12	انحراف معیار
26.09	حداقل
41.97	چارک اول
50.49	میانه
75.64	چارک سوم
81.07	حداکثر

۳-۴- رابطه شاخص‌های خشکسالی و شاخص فقر آبی

با توجه به کمبود داده، امکان مدل‌سازی‌های غیرخطی وجود نداشت. از این‌رو، از همبستگی‌های ساده یک تا چندمتغیره استفاده شد. نتایج همبستگی‌ها نشان داد استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره خطی با در نظر گرفتن شاخص خشکالی در پنجره زمانی ۱۲ ماهه به همراه دو پنجره زمانی شش ماهه مربوط به نیمسال اول و دوم باعث می‌شود همبستگی آن‌ها با شاخص فقر آبی افزایش یابد (جدول‌های ۷ و ۸). در این میان شاخص SPEI از بین چهار شاخص خشکسالی، همبستگی بالاتری را با شاخص فقر آبی داشت و رابطه چندمتغیره آن باعث شد تا ضریب تبیین از ۰/۸۵ به ۰/۹۰ افزایش یابد و مقدار خطای این شاخص نیز ۵/۷ است که نسبت به شاخص‌های دیگر کمتر است (جدول ۷). این همبستگی بالا باعث می‌شود تا تغییرات شاخص فقر آبی طی سال‌های مختلف متناسب با تغییرات شاخص خشکسالی باشد (شکل ۳).

۳-۲- مؤلفه‌های شاخص فقر آبی

برای محاسبه وزن مؤلفه‌های شاخص فقر آبی از روش پرسش‌نامه استفاده و بر اساس نظر کارشناسان و اساتید امتیازدهی شد. سپس امتیازها وارد نرم‌افزار Expert Choice شده و وزن‌ها برای تمام مؤلفه‌ها بر اساس روش AHP به‌دست آمدند (جدول ۵). نتایج نشان داد که مؤلفه منابع با وزن ۰/۳۵۴ و محیط زیست با وزن ۰/۰۴۱ به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین وزن را در بین مؤلفه‌های مورد استفاده در تعیین WPI دارند (جدول ۵).

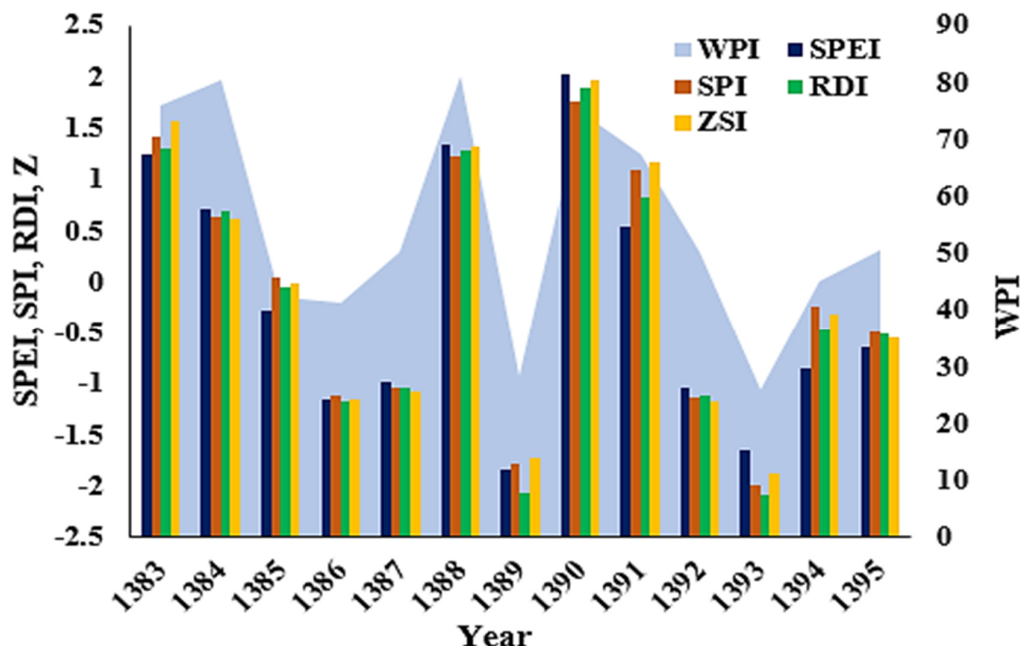
جدول ۵- مقادیر وزن‌های مؤلفه‌های شاخص فقر آبی

Table 5- Values of the weights of the components of the water poverty index

وزن	مؤلفه
0.354	مؤلفه منابع (افت آب‌بازرسی)
0.102	مؤلفه هواشناسی (دما و بارش)
0.179	مؤلفه ظرفیت (دبی)
0.195	مؤلفه مصرف (نیاز آبی)
0.041	مؤلفه محیط‌زیست (شوری)

۳-۳- شاخص فقر آبی (WPI)

در بخش‌های قبل شاخص فقر آبی در دوره آماری ۱۳۸۳-۱۳۹۵ در جدول ۴ و شکل ۲ و نتایج حاصل از ارزیابی آماری شاخص فقر آبی در طی ۱۳ سال آماری در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج حاصل از ترکیب مؤلفه‌های شاخص فقر آبی بر مبنای وزن‌های محاسبه شده نشان داد که کم‌ترین میزان شاخص فقر آبی در سال ۱۳۸۸ به مقدار ۸۱/۰۷ به‌دست آمد که منطقه مطالعاتی از نظر فقر آبی در شرایط خوبی است. درحالی‌که بیش‌ترین میزان شاخص فقر آبی در سال ۱۳۹۳ به مقدار ۲۶/۰۹ است که منطقه از نظر فقر آبی در شرایط نامطلوبی قرار گرفته است. بر اساس جدول ۶ میانگین شاخص فقر آبی در طی ۱۳ سال آماری در منطقه گرگان به میزان



شکل ۳- نمودار روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی و شاخص فقر آبی
Figure 3- Chart of changes in drought indices and water poverty index

جدول ۷- معیارهای ارزیابی خطا WPI بر اساس شاخص‌های خشکسالی
Table 7- Error evaluation criteria of WPI based on drought indicators

شاخص‌های خشکسالی	معیارهای ارزیابی			رابطه
	R ²	RMSE	MBE	
SPI	0.82	7.46	-6.60*10 ⁻⁷	WPI=56.68 - 14.60SPI ₁₂ + 18.41SPI ₆₍₁₎ + 20.88SPI ₆₍₂₎
SPEI	0.90	5.70	8.77*10 ⁻⁷	WPI=60.20 - 16.57SPEI ₁₂ + 25.55SPEI ₆₍₁₎ + 16.83SPEI ₆₍₂₎
RDI	0.84	6.90	1.08*10 ⁻⁷	WPI=57.96 + 6.56RDI ₁₂ + 5.91RDI ₆₍₁₎ + 3.99RDI ₆₍₂₎
ZSI	0.81	7.86	1.08*10 ⁻⁷	WPI=56.92 + 10.62ZSI ₆₍₁₎ + 8.96ZSI ₆₍₂₎

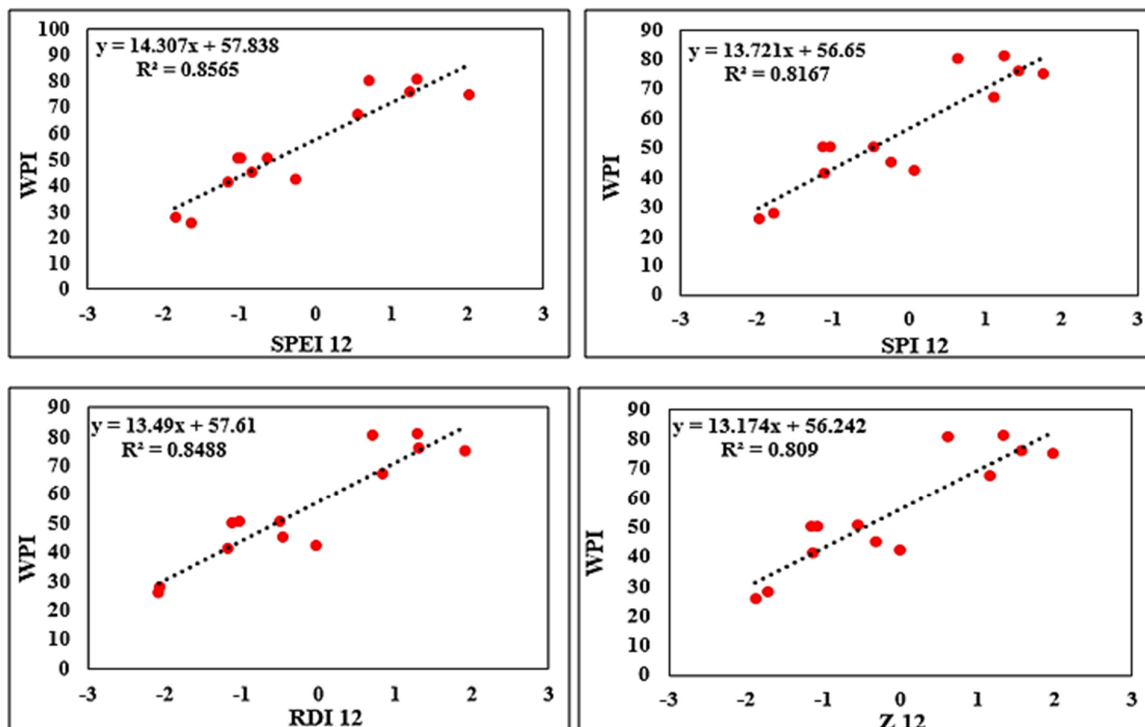
شاخص‌های خشکسالی در پنجره زمانی ۱۲ ماهه اتفاق افتاده است که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در تحقیقی Sobhani et al. (2023) شاخص فقر آبی را بر پایه مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در استان آذربایجان غربی انجام دادند. در این تحقیق نیز مشابه تحقیق حاضر فقر آبی باعث ناپایداری در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی شده است و بدون در نظر گرفتن تمهیدات فقر آبی در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ روند صعودی داشته است.

بررسی تأثیر پنجره زمانی لحاظ شده برای شاخص خشکسالی در رابطه با شاخص فقر آبی نشان می‌دهد که پنجره زمانی ۱۲ ماهه نسبت به پنجره‌های زمانی شش ماهه از همبستگی بالاتری برخوردار هست. همچنین، از بین پنجره‌های زمانی شش ماهه، در شاخص SPEI، شش ماهه اول سال که فصل‌های بهار و تابستان را شامل می‌شود همبستگی بالاتری با شاخص فقر آبی داشت که دلیل آن مصرف زیاد آب در این دوره جهت آبیاری مزارع است (جدول ۸). به‌طور کلی بهترین همبستگی بین شاخص فقر آبی با

جدول ۸- مقادیر ضریب همبستگی بین WPI با شاخص‌های خشکسالی در دوره آماری ۱۳۸۳-۱۳۹۵

Table 8- Correlation coefficient values between WPI and drought indicators in the statistical period of 2004-2016

شاخص‌های خشکسالی	R ²	شاخص‌های خشکسالی	R ²	شاخص‌های خشکسالی	R ²
SPI ₁₂	0.81	SPI ₆₍₁₎	0.51	SPI ₆₍₂₎	0.55
SPEI ₁₂	0.85	SPEI ₆₍₁₎	0.73	SPEI ₆₍₂₎	0.57
RDI ₁₂	0.84	RDI ₆₍₁₎	0.56	RDI ₆₍₂₎	0.57
ZSI ₁₂	0.80	ZSI ₆₍₁₎	0.53	ZSI ₆₍₂₎	0.54



شکل ۴- بهترین نتایج همبستگی بین WPI با شاخص‌های خشکسالی در پنجره زمانی ۱۲ ماهه

Figure 4- The best correlation results between the WPI and the drought indices in the 12-month time step

فقر آبی اتفاق افتاده است و منطقه از لحاظ فقر آبی در بحرانی‌ترین شرایط نسبت به دیگر سال‌ها است. همچنین، مشاهده شد در طی دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۸۳ روند تغییرات شاخص فقر آبی با روند تغییرات شاخص‌های خشکسالی SPEI، SPI، RDI و ZSI در همین دوره آماری دارای مطابقت خوبی است. به گونه‌ای که در سال‌هایی که خشکسالی افزایش یافته، فقر آبی نیز بیش‌تر شده و وجود خشکسالی‌های شدیدتر باعث ایجاد فقر آبی بیش‌تری در منطقه شده است.

نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص فقر آبی و شاخص‌های خشکسالی نیز نشان داد که شاخص خشکسالی در پنجره زمانی ۱۲ ماهه به همراه دو پنجره زمانی شش ماهه نیمسال اول و دوم تحت روش رگرسیون خطی چندمتغیره دارای همبستگی بالاتری نسبت به دیگر شاخص‌های خشکسالی با شاخص فقر آبی است. همچنین، شاخص فقر آبی با شاخص خشکسالی SPEI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی همبستگی بالاتری دارد و رابطه رگرسیون خطی چندمتغیره بین این دو شاخص باعث شد تا ضریب تبیین از ۰/۸۵ به ۰/۹۰ افزایش یابد و این همبستگی بالا نشان داد که تغییرات شاخص فقر آبی متناسب با تغییرات شاخص خشکسالی است. با توجه به نتایج حاصل از شاخص فقر آبی، آن‌چه بیش‌ترین نقش را در ایجاد فقر آبی منطقه مطالعاتی داشته مؤلفه مصرف (نیاز آبی) است.

۴- نتیجه‌گیری

در هر منطقه با توجه به اقلیم و میزان محدودیت‌هایی که از نظر منابع آب وجود دارد نیاز است تا از نظر موجودیت منابع آب و عواملی که باعث کاهش یا افزایش میزان آب در دسترس می‌شوند بررسی شوند تا با توجه به شرایط از این منبع حیاتی حفاظت شود. از طرفی دیگر، وجود خشکسالی می‌تواند در تشدید شرایط هر منطقه از نظر منابع آب تأثیر به‌سزایی داشته باشد. وقوع خشکسالی توأم با فقر آبی می‌تواند منطقه را از نظر موجودیت آب دچار خطر جدی کند. اما با توجه به عدم تعریف دقیق خشکسالی، شاخص‌های متعددی تعریف شده‌اند که به ارزیابی خشکسالی می‌پردازند. این که کدام شاخص برای چنین کاری مناسب‌تر هست نیاز به بررسی دارد. به همین دلیل در این تحقیق با هدف بررسی اثر خشکسالی بر شاخص فقر آبی در منطقه مورد مطالعه، چندین شاخص خشکسالی مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت مشخص شد که بین شاخص خشکسالی دو متغیره و شاخص فقر آبی همبستگی بالایی وجود دارد و خشکسالی متأثر از متغیرهای دما و بارش می‌تواند باعث تشدید شرایط منطقه از نظر فقر آبی شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده در طی سال‌های آماری ۱۳۸۳-۱۳۹۵ شاخص فقر آبی در سال ۱۳۸۸ با مقدار ۸۱/۰۷ نیز کم‌ترین میزان فقر آبی را داشته است و منطقه مطالعاتی دارای شرایط مطلوبی است، درحالی که در سال ۱۳۹۳ با مقدار ۲۶/۰۹ بیش‌ترین

چندک بیزی (مطالعه موردی: ایستگاه هاشم‌آباد گرگان).
 پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۲(۴۶)، ۷۳-۸۸
https://clima.irimo.ir/article_137528.html?lang=fa
 بنی مهدی، ادیب، سید، و خلیلی، داور (۱۳۹۱). تجزیه و تحلیل
 مقایسه‌های رفتار شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPEI و
 SPI با بکارگیری آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری همبستگی
 در ایستگاه‌های منتخب ایران. اولین کنفرانس ملی راه کارهای
 دستیابی به توسعه پایدار (کشاورزی، منابع طبیعی و
 محیط‌زیست)، تهران. ۱۹/۰۵/۲۰۱۹. <https://civilica.com/doc/196589/>

جهانگیر، محمدحسین، اصغری کلشانی، فاطمه، و ستاریان‌اصیل، کتایون
 (۱۴۰۱). مطالعه‌ی تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی
 (SPI) و هیدرولوژیک (SSI) براساس بهترین تابع توزیع تجمعی
 برای حوضه‌ی آبریز ارومیه. *مجله‌ی آبیاری و مدیریت آب و خاک*،
 ۴(۴)، ۵۳-۶۳. doi:10.22098/MMWS.2022.10810.1089
 جان‌بزرگی، محمد، حنیفه‌پور، مهین، و خسروی، حسن (۱۴۰۰). تغییرات
 زمانی خشکسالی هواشناسی-هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: استان
 گیلان). *مجله‌ی آبیاری و مدیریت آب و خاک*، ۱۱(۲۱)، ۱-۱۳.
 doi:10.22098/mmws.2021.1215

رضایی‌قلعه، لاله، و قربانی، خلیل (۱۳۹۷). تحلیل تطبیقی رفتار
 شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های
 منتخب استان گلستان. *هواشناسی کشاورزی*، ۱۶(۱)، ۳۱-۴۰.
 doi:10.22125/agmj.2018.113661.

سبحانی، رضا، عمادی، علیرضا، فضل‌اولی، رامین، و زمان‌زاده قویدل،
 سروین (۱۴۰۱). سنجش نوآورانه شاخص فقرآبی بر پایه
 مدل‌های ریاضی-تحلیل مؤثر و داده‌محور در استان آذربایجان
 غربی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۹(۲)، ۵۴-۷۰.
https://www.iwrr.ir/article_165059.html
 سلامی، حبیب‌الله، و طاهری ریکنده، عمران (۱۳۹۸). سنجش وضعیت
 امنیت آبی در استان‌های ایران. *اقتصاد و توسعه کشاورزی*،
 ۱۳(۱)، ۷۵-۹۴. doi:10.22067/jead2.v0i0.77072

طالبی، حسین، و امینی، عباس (۱۳۹۷). بررسی ابعاد کم آبی با استفاده
 از روش شاخص فقر آبی (WPI) و تحلیل مقایسه‌ای آن در
 بخش‌های شهرستان قم. *آمایش سرزمین*، ۱۰(۲)، ۳۴۵-۳۶۶.
 doi:10.22059/jtep.2019.272853.669940

عوض‌پور، نسرین، فرامرزی، مرزبان، امیدپور، رضا، و مهدی‌زاده،
 حسین (۱۴۰۰). پایش تأثیر خشکسالی بر تغییرات پوشش گیاهی
 با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: حوزه آبخیز
 ایلام). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۱(۴)، ۱۲۵-۱۴۳.
 doi:10.22126/ges.2022.7130.2472

قربانی، خلیل (۱۳۹۸). تحلیل مکانی-زمانی نوسانات تراز آب زیرزمینی در
 آبخوان‌های عمیق و نیمه عمیق استان گلستان با استفاده از
 آزمون‌های ناپارامتری در محیط GIS. *آبیاری و زهکشی ایران*،

به نظر می‌رسد اصلی‌ترین اقدام در کاهش چالش فقر آبی در
 منطقه مورد مطالعه تمرکز مدیریت در بخش مصرف آب است.
 لذا ضروری است با استفاده از بهینه‌سازی مصرف آب، الگوی
 کشت مناسب و آیش‌گذاری در زمان خشکسالی از فقر آبی منطقه
 کاسته شود. همچنین، با به‌کارگیری طرح‌های احیاء و تعادل
 بخشی آب‌های زیرزمینی، تجهیز چاه‌ها به ابزار اندازه‌گیری
 هوشمند و فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی جوامع نقش مؤثر و
 کلیدی را در تصمیم‌گیری و تدوین برنامه‌های مدیریتی ایفا نمود.

سپاس‌گزاری

این تحقیق در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه علوم
 کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفته است. نویسندگان از
 شرکت آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی برای در اختیار گذاشتن
 داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز تشکر می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در
 خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این تحقیق وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه‌ی اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

منیره لیاقی: نگارش، تهیه‌ی پیش‌نویس اصلی، نرم‌افزار؛ خلیل
 قربانی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، منابع، نرم‌افزار، ویرایش
 نسخه‌های خطی، نظارت؛ قربان قربانی نصرآبادی: تحلیل و
 بازبینی؛ میثم سالاری جزی: مفهوم‌سازی، بازبینی؛ فریبا نیرومند
 فرد: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، تهیه‌ی پیش‌نویس اصلی.

منابع

آسیابی‌هیر، رقیه، مصطفی‌زاده، رئوف، رئوف، مجید، و اسمعیلی‌عوری،
 اباذر (۱۳۹۴). شاخص فقر آب و اهمیت آن در مدیریت منابع آب.
ترویج و توسعه آبخیزداری، ۳(۱۱)، ۱۵-۲۲. https://www.wmji.ir/article_697021.html
 آسیابی‌هیر، رقیه، مصطفی‌زاده، رئوف، رئوف، مجید، و اسمعیلی‌عوری،
 اباذر (۱۳۹۶). ارزیابی چند معیاره تغییرات مکانی شاخص فقر آب
 در تعدادی از حوضه‌های آبخیز استان اردبیل. *کوه‌پدولوژی*،
 ۴(۴)، ۹۹۷-۱۰۰۹. doi:10.22059/ije.2017.63231
 براخان‌پور، صدیقه، قربانی، خلیل، سالاری جزی، میثم، و رضایی‌قلعه،
 لاله (۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات تبخیر و تعیین نقش عوامل
 مؤثر بر آن با استفاده از روش‌های رگرسیون چندک و رگرسیون

- نظری‌فر، محمدهادی، و سالاری، امیر (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه‌بندی ریسک خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) (مطالعه موردی حوضه کرخه). *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۵(۶)، ۸۷-۱۰۰. doi:10.22052/6.15.87
- یزدی، نبی اله، موسوی، سید نعمت اله، شیروانیان، عبدالرسول، و زارعی، عبدالرسول (۱۴۰۰). ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیم و خشکسالی بر شاخص فقر آب در دشت فسا. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۱(۳)، ۲۸۹-۳۰۴. doi:10.22125/iwe.2021.128206
- https://idj.iaid.ir/?_action=article_۱۵۰۴-۱۵۱۴_۱۳۵&kw=258097&_kw=Fitite&lang=en (۱۳)۵
- کاظم‌نژاد، زهرا، فرج زاده اصل، منوچهر، و برنا، رضا (۱۳۹۷). ارزیابی آسیب پذیری کشاورزی استان گیلان با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری اقلیمی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۵(۴)، ۸۹-۱۰۶. https://www.sid.ir/paper/379900/fa
- مجرد، فیروز، قمرنیا، هوشمند، و نصیری، شیدا (۱۳۸۶). برآورد بارش مؤثر و نیاز آبی برای کشت برنج در جلگه مازندران. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳۸(۳)، ۵۴. https://jrg.ut.ac.ir/article_17770.html

References

- Abramowitz, M., & Stegun, I.A. (1965). *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publication, New York.
- Ahmad, M., Sinclair, C., & Werritty, A. (1988). Loglogistic flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 98(3-4), 205-224. doi:10.1016/0022-1694(88)90015-7
- Asiabi-Hir, R., Mostafazadeh, R., Raouf, M., & Esmali-Ouri, A. (2015). Water poverty index and its importance in water resources management. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11), 17-22. https://www.wmji.ir/article_697021.html. [In Persian]
- Asiabi-Hir, R., Mostafazadeh, R., Raouf, M., & Esmali-Ouri, A. (2018). Multi-criteria evaluation of water poverty index spatial variations in some watersheds of Ardabil Province. *Iranian Journal of Echohydrology*, 4(4), 943-1268. doi:10.22059/ije.2017.63231. [In Persian]
- Avazpour, N., Faramarzi, M., Omidipour, R., & Mehdizadeh, H. (2022). Monitoring the drought effects on vegetation changes using satellite imagery (Case Study: Ilam Catchment). *Geography and Environmental Sustainability*, 11(4), 125-143. doi:10.22126/ges.2022.7130.2472. [In Persian]
- Bani Mahd, S., Adib, S., & Khalili, D. (2011). Analyzing comparisons of SPEI and SPI meteorological drought indicators by using parametric and non-parametric correlation tests in selected stations of Iran. The First National Conference on Ways to Achieve Sustainable Development (Agriculture, Natural Resources And Environment). Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/196589/. [In Persian]
- Barakhanpour, S., Ghorbani, K., Salarijazi, M., & Rezaeighale, L. (2021). Aanalysis of trend of evaporation changes and determining the role of factors affecting it using quantile regression and bayesian quantile regression (Case Study: Hashem-Abad Station, Gorgan). *Journal of Climate Research*, 12(46), 73-88. https://clima.irimo.ir/article_137528.html?lang=en. [In Persian]
- Edwards, D.C., & McKee, T.B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report*, 97-2. http://hdl.handle.net/10217/170176
- Farsani, I.F., Farzaneh, M.R., Besalatpour, A.A., Salehi, M.H., & Faramarzi, M. (2019). Assessment of the impact of climate change on spatiotemporal variability of blue and green water resources under CMIP3 and CMIP5 models in a highly mountainous watershed. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(1-2), 169-184. doi:10.1007/s00704-018-2474-9
- Ghorbani, Kh. (2019). Spatial and temporal analysis of groundwater level fluctuations in deep and shallow aquifers of Golestan province using nonparametric statistical tests in GIS environment. *Iranian Journal Irrigation and Drainage*, 13(5), 1504-1514. doi:10.1007/s00704-018-2474-9. [In Persian]
- Givati, A., Thirel, G., Rosenfeld, D., & Paz, D. (2019). Climate change impacts on streamflow at the upper Jordan River based on an ensemble of regional climate models. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 92-109. doi:10.1016/j.ejrh.2018.12.004
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. doi:10.13031/2013.26773
- Jahangir, M.H., Asghari Kolshani, F., & Sataryan asil, K. (2022). Comparative study of drought meteorological (SPI) and hydrological (SSI) indices based on the best cumulative distribution function for Urmia Basin. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 53-63.

- doi:10.22098/mmws.2022.10810.1089. [In Persian]
- Janbozorgi, M., Hanifeh Pour, M., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought (Case study: Guilan Province). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(2), 1-13. doi:10.22098/mmws.2021.1215. [In Persian]
- Kazemnezhad, Z., Farajzadeh, M., & Borna, R. (2019). Assessing vulnerability of agriculture in the face of climate change (Case Study: Gilan Province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(4), 89-106. <https://sid.ir/paper/379900/en>
- 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.
- Mojarrad, F., Qamraniya, H., & Nasiri, S. (2007). Estimation of effective rainfall and water requirement for rice cultivation in Mazandaran Plain. *Geographical Research*, 38(3), 54. https://jrg.ut.ac.ir/article_17770.html. [In Persian]
- Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, 26(7), 971-985. doi:10.1002/joc.1264.
- Nazarifar, M., & Salari, A. (2017). Drought risk assessment and zoning using the standardized precipitation index (SPI) (Case Study: Karkheh Basin). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 6(15), 87-100. 10.22052/6.15.87. [In Persian]
- Nosrati, K., & Zareiee, A.R. (2011). Assessment of meteorological drought using SPI in West Azarbaijan Province, Iran. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 15(4), 563- 569. [In Persian]
- Pan, Y.H., Gu, C.J., Ma, J.Z., Zhang, T.S., & Zhang, H. (2014). Water poverty index in the inland River Basins of hexi corridor. *Gansu Province. Advanced Materials Research*, 864, 2371-2375. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.864-867.2371
- Rezaei Ghaleh, L., & Ghorbani, Kh. (2018). Comparative analyses of SPI and SPEI meteorological drought indices (Case study: Golestan province). *Journal of Agricultural Meteorology*, 6(1), 31-40. <https://doi.org/10.22125/agmj.2018.113661>. [In Persian]
- Salami, H., & Taheri Reykandeh, A. (2019). Assessing the state of water security in Provinces of Iran. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 33(1), 75-94. doi:10.22067/jead2.v0i0.77072. [In Persian]
- Sobhani, R., Emadi, A., Fazloula, R., & Zamanzad-Ghavidel, S. (2022). Innovative measurement of water poverty index in West Azerbaijan Province based on effective data-mining mathematical-analytical models. *Iran-Water Resources Research*, 19(2), 54-70. doi: 20.1001.1.17352347.1402.19.2.4.1. [In Persian]
- Sullivan, C.A., Meigh, J.R., & Giacomello, A.M. (2003). The water poverty index: development and application at the community scale. *Natural Resources Forum*, 27(3), 189-199. doi:10.1111/1477-8947.00054
- Talebi, H., & Amini, A. (2017). Investigating the dimensions of water scarcity using the water poverty index (WPI) method and its comparative analysis in the parts of Qom city. *Town and Country Planning*, 10(2), 345-366. doi:10.22059/jtcp.2019.272853.669940. [In Persian]
- Tsakiris, G. (2004). Meteorological drought assessment. Paper prepared for the needs of the European Research Program MEDROPLAN (Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning). Zaragoza, Spain volume.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833. doi:10.1007/s11269-006-9105-4
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & LópezMoreno, J.I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climatology*, 23(7), 1696-1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1
- Wurtz, M., Angeliaume, A., Herrera, M.T.A., Blot, F., Paegelow, M., & Reyes, V.M. (2019). A spatial application of the water poverty index (WPI) in the State of Chihuahua, Mexico. *Water Policy*, 21(1), 147-161. doi: 10.2166/wp.2018.152
- Yazdi, N., Mousavi, S. N., Shirvanian, A., Zarei, A. (2021). Assessing the Effects of Climate and Drought Changes on the Water Poverty Index in the Fasa Plain. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 11(3). 289-304. 10.22125/iwe.2021.128206. [In Persian]
- Ye, L., Shi, K., Zhang, H., Xin, Z., Hu, J., & Zhang, C. (2019). Spatio-temporal analysis of drought

- indicated by SPEI over Northeastern China. *Water*, 11(5), 908. doi:10.3390/w11050908
- Zarei, A.R., Shabani, A., & Mahmoudi, M.R. (2019). Comparison of the climate indices based on the relationship between yield loss of rain-fed winter wheat and changes of climate indices using GEE model. *Science of the Total Environment*, 661, 711–722. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.01.204.
- Zarei, A.R., & Moghimi, M.M. (2019). Environmental assessment of semi-humid and humid regions based on modeling and forecasting of changes in monthly temperature. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1457-1470. doi:10.1007/s13762-017-1600-z.
- Zhang, R., Duan, Z., Tan, M., & Chen, X. (2012). The assessment of water stress with the water poverty index in the Shiyang River Basin in China. *Environmental Earth Sciences*, 67(7), 2155-2160. doi: 10.1007/s12665-012-1655-6.