

Research Paper



Investigating the stability of the groundwater level in the Eslamabad-e Gharb plain (Kermanshah province) and evaluating the future situation with atmospheric general circulation models



Shokoofeh Esmacili¹, Firouz Mojarad^{2*}



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/hyd.2024.62351.1747

Reference to this article: Esmacili, Shokoofeh; Mojarad, Firouz. (2024). Investigating the stability of the groundwater level in the Eslamabad-e Gharb plain (Kermanshah province) and evaluating the future situation with atmospheric general circulation models. *Hydrogeomorphology*, 11 (41): 115 – 134.

Keywords

GRI, SPI, Groundwater level, Atmospheric general circulation models, Eslamabad-e Gharb plain, West of Iran

Receive Date: 2024/07/05

Accept Date: 2024/10/19

Available: 2025/01/19

ABSTRACT

A major part of the fresh water demand in the world is provided through groundwater. Any abnormality in groundwater directly affects human. Droughts and wet periods are among the most important factors that have a significant effect on the fluctuation of the groundwater level. The purpose of this study is to investigate the relationship between the Standardized Precipitation Index (SPI) as a meteorological drought index and the Groundwater Resource Index (GRI) as a hydrological drought index in the Eslamabad-e Gharb plain (Kermanshah Province) in a 20-year period and predict the future state of the groundwater level. Both indices were calculated in time scales of 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 and 48 months. To obtain the relationship between two indices, the correlation coefficient was used once in different time scales and again with time delays of 1 to 12 months in the GRI index. Then, the future precipitation data of the plain in a 20-year period were extracted with four CMIP6 models under three scenarios, and then were downscaled with the SDSM model. Finally, the CanSM5-CanOE model was selected and its downscaled data were entered into the regression model of the relationship between precipitation and water level to predict the future state of the groundwater level. The results showed that the highest significant correlation coefficient between 48-month SPI and 48-month GRI values is observed at a time delay of 12 months, which indicates the effect of precipitation on changes in the groundwater level in medium and long-term scales. The forecast results of the groundwater level for the coming period indicate a water level drop of 5.17, 6.02 and 8.08 meters respectively under the three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5.

* Corresponding Author: Firouz Mojarad

E-mail: f_mojarad@yahoo.com

1. M. Sc. in Climatology, Geography Dept., Razi University, Kermanshah, Iran (sh.esmacili5416@gmail.com)

2. * Associate Professor of Climatology, Geography Dept., Razi University, Kermanshah, Iran (f_mojarad@yahoo.com)

Extended Abstract**Introduction**

A major part of the fresh water demand in the world is provided through groundwater. Any abnormality in groundwater directly affects human life and the stability of the environment. Droughts and wet periods are among the most important factors that have a significant effect on the fluctuation of the groundwater level. The aim of this study is to investigate the relationship between the Standardized Precipitation Index (SPI) as a meteorological drought index and the Groundwater Resource Index (GRI) as a hydrological drought index in the Eslamabad-e Gharb plain (Kermanshah Province) in a 20-year period (1998-2017) and predicting the future status of the groundwater level. Such a study provides the latest picture of the current situation of the groundwater in the region in order to reduce the effects of drought and manage and plan the existing groundwater resources rationally to achieve a sustainable environmental situation and can be generalized to other regions of the country, especially the areas that have acute groundwater problems.

Methodology

The area studied in this research is Eslamabad-e Gharb plain located in the west of Kermanshah province. The area of the plain is approximately 460 square kilometers and it is located at an altitude of approximately 1300 meters above sea level. The data used in the research includes two categories: 1- monthly rainfall data of Eslamabad-e Gharb synoptic station in a 20-year period (1998-2017) and 2- monthly groundwater level data of 20 piezometric wells of the plain in the same period of 20 years. The values of both Standardized Precipitation Index (SPI) and Groundwater Resource Index (GRI) were calculated in time scales of 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 and 48 months. To obtain the relationship between two indices, the correlation coefficient was used once in different time scales and again with time delays of 1 to 12 months in the GRI index. Then, the future precipitation data of the plain in a 20-year period (2022-2041) were extracted with four CMIP6 models under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, and then were downscaled with the SDSM model. Finally, according to the validation indices, the CanSM5-CanOE model was selected and its downscaled data were entered into the regression model of the relationship between precipitation and water level to predict the future state of the groundwater level.

Results and Discussion

The analysis of SPI values showed that with the passing of years, the temporal irregularity of rainfall becomes more prominent and the number and fluctuation of meteorological droughts increase in medium and long-term time scales. The peak of drought in the region happened in 2009. Also, based on the GRI values, since the beginning of the period, the water level in Eslamabad-e Gharb plain has had a decreasing but irregular trend in all time series. The year 2008 is almost the year of turning the groundwater level from wet to drought. The most severe groundwater droughts occurred at the end of the period, between 2013 and 2017. The correlation coefficients between SPI and GRI values in different time scales were generally weak, which can be due to two reasons; first, the infiltration of water caused by melting snow into the deep ground and its joining to groundwater is usually accompanied by a delay. Secondly, the amount of monthly rainfall and the amount of withdrawal from groundwater do not have a regular rhythm. Therefore, again, these coefficients were calculated with a time delay condition, based on which, the highest significant correlation coefficient between 48-month SPI and 48-month GRI values was observed in the condition of a time delay of 12 months, which indicates the effect of precipitation on changes in the groundwater level in medium and long-term scales. Examining the annual zoning maps of the GRI values clearly shows the change from wet to drought in the region from the beginning years of the period to the end years. According to the maps of the water level drop, the groundwater level has decreased over time in all places of the plain in the 20-year period, and no area has faced an increase in the groundwater level. The highest drop in the groundwater level was in the middle parts of the plain with a decrease of 1.25 to 1.9 meters per year. The forecast results

of the groundwater level for the coming period (2022-2041) indicate a water level drop of 5.17, 6.02 and 8.08 meters respectively under the three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5.

Conclusions

By examining the relationship between meteorological and hydrological drought indices in the region, it is clear that the medium-term and long-term effect of drought on the groundwater level in the region is much more significant than the short-term period. Regardless of the amount of groundwater drop, we are facing a continuous drop throughout the plain, which will continue in the future. The approximate similarity of the drop of the groundwater level in this plain with the drop calculated in other studies conducted in other plains of Iran shows the critical situation of the groundwater in the plains of the country. As a result, due to the decrease in the amount of precipitation in some parts of the future period and also the role of other factors such as indiscriminate extraction of groundwater, in the case of continuous lack of attention to human factors, the groundwater level will drop sharply in the future and cause various environmental crises. Therefore, it is very necessary to pay continuous attention of officials and executive organizations to reduce the effects of human factors in the drop of groundwater level and to conduct more studies in this field.



مقاله پژوهشی



بررسی پایداری سطح آب زیرزمینی در دشت اسلام آباد غرب (استان کرمانشاه) و ارزیابی وضعیت آینده با مدل های گردش عمومی جو



شکوفه اسمعیلی^۱، فیروز مجرد^{۲*}



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت کاملاً قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: اسمعیلی، شکوفه؛ مجرد، فیروز. (۱۴۰۳). بررسی پایداری سطح آب زیرزمینی در دشت اسلام آباد غرب (استان کرمانشاه) و ارزیابی وضعیت آینده با مدل های گردش عمومی جو. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۴۱): ۱۱۵-۱۳۴.

DOI:10.22034/hyd.2024.62351.1747



چکیده

بخش عمده‌ای از تقاضای آب شیرین در جهان از طریق آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. هرگونه ناهنجاری در آب‌های زیرزمینی به‌طور مستقیم بر زندگی انسان تأثیر می‌گذارد. از مهم‌ترین عواملی که در نوسان سطح آب‌های زیرزمینی تأثیر به‌سزایی دارند، خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها هستند. هدف از این مطالعه، بررسی رابطه بین شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به‌عنوان شاخص خشکسالی هواشناسی و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) به‌عنوان شاخص خشکسالی هیدرولوژیک در دشت اسلام آباد غرب (استان کرمانشاه) در یک دوره ۲۰ ساله و پیش‌بینی وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی در منطقه است. مقادیر هر دو شاخص در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شد. برای به‌دست آوردن رابطه بین دو شاخص، از ضریب همبستگی، یک بار در مقیاس‌های زمانی مختلف و بار دیگر با تأخیرهای زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه در شاخص GRI استفاده گردید. سپس داده‌های بارش آینده دشت مورد نظر در یک دوره ۲۰ ساله با چهار مدل گزارش ششم (CMIP6) تحت سه سناریوی انتشار استخراج و با مدل SDSM ریزمقیاس‌نمایی شد. نهایتاً داده‌های مدل CanSM5-CanOE انتخاب و برای پیش‌بینی وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی، وارد مدل رگرسیونی رابطه بارش با سطح آب شد. نتایج نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی معنی‌دار بین شاخص SPI ۴۸ ماهه و شاخص GRI ۴۸ ماهه در شرایط تأخیر زمانی ۱۲ ماهه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر بارش بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقیاس‌های میان‌مدت و بلندمدت است. نتایج پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برای دوره آتی بیانگر افت سطح آب به‌ترتیب به‌میزان ۵/۱۷، ۶/۰۲ و ۸/۰۸ متر تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است.

کلیدواژه‌ها

شاخص GRI، شاخص SPI، سطح آب زیرزمینی، مدل‌های گردش عمومی جو، دشت اسلام آباد غرب، غرب ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

* نویسنده مسئول: فیروز مجرد

رایانامه: f_mojarrad@yahoo.com

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران (sh.esmaeili5416@gmail.com)

۲. * دانشیار آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران (f_mojarrad@yahoo.com)

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین منابع آب در کره زمین به شمار می‌رود و در مناطق خشکی مانند ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب مورد نیاز بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (حیدری آقاگل و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۱۲). استفاده بیش از حد از این منابع، کاهش سطح آن‌ها را به دنبال داشته و مشکلات زیادی را ایجاد کرده است (مقامی مقیم و تقی‌پور، ۱۳۹۸: ۲۸) که از جمله می‌توان به کاهش کیفیت مخزن آب زیرزمینی (جبرائیلی اندریان و همکاران، ۱۴۰۳: ۷۵) و آلودگی آنها (ملکی و همکاران، ۱۴۰۳: ۱۰۲) اشاره کرد. در دهه‌های اخیر شاهد تأثیر دوگانه خشکسالی‌های متوالی ناشی از گرما در اکوسیستم‌های عرض‌های جغرافیایی متوسط و روندهای بارندگی غیرقابل پیش‌بینی بوده‌ایم که منجر به ناهنجاری‌های قابل توجهی در الگوهای تغذیه آب زیرزمینی شده است (دیوداتو^۱ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). از سوی دیگر توسعه مراکز مسکونی و اراضی کشاورزی نیازمند برنامه‌ریزی جدی برای تأمین مداوم آب است. بنابراین، ضروری است که درک ما از تأمین آب در اکوسیستم‌های حوضه‌های رودخانه‌ای و به‌طور ویژه دشت‌ها افزایش یابد تا بتوان بدون مشکل و به‌صورت مداوم آب مورد نیاز بخش‌های مختلف را تأمین کرد.

بارندگی و دبی از مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژی هستند که پیش‌بینی و شناسایی رفتار آن‌ها برای مدیریت منابع آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (بهره‌مند و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۴). به تبع نوسانات بارندگی و دما، نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌تواند معضلات عمده‌ای را موجب شود و پایداری محیط را به هم بزند. از مهم‌ترین عواملی که در نوسان سطح آب‌های زیرزمینی تأثیر به‌سزایی دارند، خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها هستند. خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد (علیزاده، ۱۳۹۴: ۲۷۶). انتظار می‌رود خشکسالی یکی از چالش‌های اصلی ناشی از تغییرات آب‌وهوایی در دهه‌های آینده باشد (مسگوئر-رویس^۲ و همکاران، ۲۰۲۳: ۱). بر اساس پنجمین گزارش ارزیابی جامع که توسط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) در سال ۲۰۱۴ منتشر شد، دمای سطح زمین طی ۱۳۰ سال گذشته ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. افزایش دما باعث افزایش شدت و فراوانی رویدادهای شدید آب‌وهوایی مانند خشکسالی و سیل می‌شود (فنگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۰: ۴۳). به‌طور کلی خشکسالی‌ها به دلایل متعدد رخ می‌دهد و بر اساس بازخورد در رواناب سطحی/زیرسطحی، جو، کشاورزی/پوشش گیاهی و اقتصاد، به چهار دسته هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم می‌شود (کومار^۴، ۲۰۲۲: ۸۳؛ جونگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۲۹۳؛ تلادی^۶ و همکاران، ۲۰۲۲: ۱). غالباً خشکسالی‌ها از خشکسالی هواشناسی شروع شده و به‌ترتیب خشکسالی هیدرولوژیکی، خشکسالی کشاورزی و سرانجام خشکسالی اقتصادی-اجتماعی را در پی دارد (علیزاده، ۱۳۹۴: ۲۷۶-۲۷۷). نتیجه خشکسالی هواشناسی که با کاهش قابل توجه دوره بارش یا کمبود آن مشخص می‌شود، اختلال در عملکرد اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی و همچنین مشکلات ناشی از اختلالات جدی هیدرولوژیکی است که بر سیستم‌های تولید و مصرف تأثیر می‌گذارد (باک و کوبیاک-وژیسکا^۷، ۲۰۱۶: ۱۴۵).

تغییرات آب‌وهوایی یکی از معضلات کنونی جامعه بشری است. این تغییرات تأثیرات مهمی بر رژیم‌های هیدرولوژیکی محلی و منطقه‌ای خواهد داشت (دیبایک و کولیبالی^۸، ۲۰۰۵: ۱۴۵). یکی از پیامدهای تغییر اقلیم، دگرگونی در توزیع مکانی و نوسانات زمانی وقوع نزولات جوی است (وترالد و مانابه^۹، ۲۰۰۲: ۲). بررسی شدت و ضعف خشکسالی یا ترسالی با استفاده از شاخص‌های مناسب، ابزار مفیدی برای مطالعه نوسانات اقلیمی تأثیرگذار بر سطح آب زیرزمینی است (کریمی‌راد و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۶۲).

تاکنون در زمینه نوسان سطح آب زیرزمینی و اثرات بارندگی و خشکسالی بر روی آن مطالعات زیادی صورت گرفته است. از جمله سیر خشکسالی‌های هواشناسی و تأثیر آنها بر وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در زیرحوضه‌های حوضه ویستولا لهستان بین سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۱۰ با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش (SPI) به عنوان شاخص خشکسالی هواشناسی از یک سو و شاخص

1- Diodato
2- Meseguer-Ruiz
3- Feng
4- Kumar

5- Jung
6- Tladi
7- Bak & Kubiak-Wójcicka
8- Dibike & Coulibaly

9- Wetherald & Manabe
1 - Vistula
1 - Standardized Precipitation Index

استاندارد شده سطح آب^۱ (SWI) و نیز شاخص استاندارد شده رواناب^۲ (SRI) به عنوان شاخص های خشکسالی هیدرولوژیکی از سوی دیگر مطالعه و به قوی ترین روابط بین شرایط بارش و شرایط هیدرولوژیکی در مرکز منطقه و ضعیف ترین آنها در کوهپایه ها اذعان شد (کوبیاک-وژیسکا و باک، ۲۰۱۸: ۱). همچنین در لهستان به تعیین اثر بارش و تأثیر خشکسالی های هواشناسی بر سطح آب زیرزمینی در منطقه کوجاوی و ویلکوپولسکا^۳ با استفاده از دو شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و استاندارد شده سطح آب زیرزمینی^۴ (SGI) در چهار مقیاس زمانی ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه پرداخته شد که نتایج کار حاکی از عدم وجود رابطه خطی بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی بود. مقادیر نسبتاً ضعیف ضریب همبستگی بین شاخص های SPI و SGI نشان داد که خشکسالی های زیرزمینی تحت تأثیر سایر عوامل مستقل از بارندگی قرار گرفته اند (کوبیژ و باک، ۲۰۱۹: ۱۸۷). بررسی وضعیت آب های زیرزمینی در فلات منبوم سینگهوم هند حاکی از کاهش شدید سطح آب زیرزمینی و ذخیره آب زیرزمینی بود. دلایل اصلی این چالش های نگران کننده، ساختار زمین شناسی و برداشت بیش از حد از آب های زیرزمینی برای مصارف شرب و آبیاری است (قوش و برا، ۲۰۲۳). به منظور درک روابط بین خشکسالی های هواشناسی و سطح آب زیرزمینی در آبخوان ادواردز تگزاس، از دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای تعیین خشکسالی هواشناسی و شاخص سطح استاندارد آب زیرزمینی (SGI) برای تعیین خشکسالی های آب زیرزمینی استفاده شد که نتیجه مطالعه نشان دهنده همبستگی خوب بین مقادیر SPI و SGI بود (اودامری^۵ و همکاران، ۲۰۱۹: ۷۰). در مادیپرادش هند رابطه بین ناهنجاری های آب زیرزمینی منطقه ای و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به منظور ارزیابی زمان واقعی واکنش آب زیرزمینی به شرایط هواشناسی بررسی شد. نتایج کار نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر SPI ۶ ماهه و ناهنجاری های منابع آب زیرزمینی وجود دارد، در حالی که همبستگی ضعیفی برای مقادیر SPI سالانه به دست آمد (کومار^۶ و همکاران، ۲۰۱۷: ۱). ادغام شاخص های مختلف خشکسالی در یک ابزار واحد می تواند خشکسالی ها را بهتر نشان دهد و ممکن است یک رویکرد ارزشمند برای مدیریت منابع آب باشد (بایک^۷ و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۱۷۷). با استفاده از سوابق تاریخی و مدل سازی هیدرولوژیکی و نهایتاً به دست آوردن یک سری زمانی از تغذیه آب های زیرزمینی طی چند صد سال اخیر در حوضه رودخانه تیبیر ایتالیا مشخص شد که خشکسالی آب های زیرزمینی در ۲۶ الی ۳۶ درصد از سال های دوره مورد بررسی اتفاق افتاده است (دیوداتو^۸ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱).

در ایران نیز مطالعات خوبی در زمینه موضوع پژوهش حاضر صورت گرفته است. از جمله خشکسالی هواشناسی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان در یک دوره زمانی ۱۸ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۲) مطالعه و مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی^۲ (GRI) در مقیاس های زمانی مختلف به دست آمد که نتایج آزمون همبستگی نشان دهنده ارتباط قابل توجه بین این دو شاخص تحت شرایط با و بدون تأخیر زمانی بود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۱). در پژوهشی دیگر برای پیش بینی سطح آب زیرزمینی دشت خرم آباد از مدل های رگرسیونی و گردش عمومی جو CMIP6 استفاده و عنوان شد که سطح آب زیرزمینی طی سال های آتی افت حدود ۱ تا ۱/۵ متری خواهد داشت (دهقانی و همکاران، ۱۴۰۳: ۱).

با توجه به پژوهش های انجام گرفته، هدف مطالعه حاضر آنست که در چهارچوبی جامع، ضمن بررسی اثرات رخداد دوره های خشکسالی و ترسالی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت اسلام آباد غرب، وضعیت آینده سطح آب در این دشت با استفاده از مدل های تغییر اقلیم بر پایه رابطه بین بارش و تغییرات سطح آب زیرزمینی پیش بینی شود. چنین مطالعه ای جدیدترین تصویر را از وضعیت موجود آب های زیرزمینی منطقه به منظور کاهش اثرات خشکسالی و مدیریت و برنامه ریزی منطقی منابع آب موجود زیرزمینی برای رسیدن به یک وضعیت پایدار محیطی ارائه می دهد و قابل تعمیم به سایر مناطق کشور، به خصوص مناطقی که مشکلات حاد آب زیرزمینی دارند، می باشد.

1- Standardized Water-level Index

2- Standardized Runoff Index

3- Kubiak-Wójcicka & Bąk

4- Kujawy & Wielkopolska

5- Standardized Groundwater Level

Index

6- Kubicz & Bak

7- Ghosh & Bera

8- Uddameri

9- Kumar

1 - Baik 0

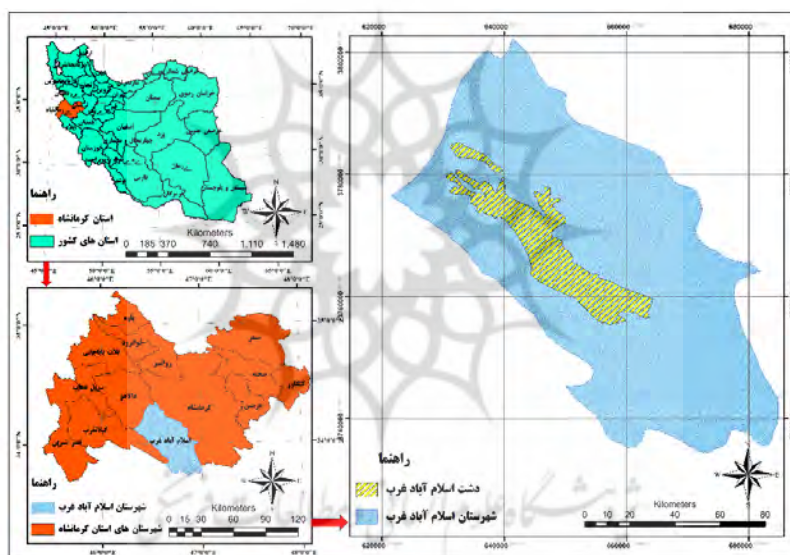
1 - Diodato 1

1 - Groundwater Resource Index

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان اسلام‌آباد غرب از توابع استان کرمانشاه در غرب کشور است. این شهرستان از شرق و شمال به شهرستان کرمانشاه، از غرب به شهرستان دالاهو و گیلانغرب و از جنوب به شهرستان سیروان در استان ایلام محدود می‌گردد. منطقه مورد مطالعه (دشت اسلام‌آباد غرب) با گسترش شمال‌غربی-جنوب‌شرقی بین عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}24'$ تا $34^{\circ}20'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $46^{\circ}47'$ تا $46^{\circ}47'$ شرقی قرار دارد. مساحت دشت تقریباً ۴۶۰ کیلومتر مربع است و در ارتفاع تقریبی ۱۳۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). از نظر بارندگی، دشت اسلام‌آباد غرب تحت تأثیر مکانیسم‌های مختلف صعود قرار دارد و هرگاه در کشور نفوذ بادهای غربی از دامنه بیشتری برخوردار باشد، بارش زیادی را دریافت می‌کند. «میانگین دمای این منطقه در دی ماه ۴- درجه سانتی‌گراد و در تیر ماه حداکثر ۳۶ درجه است. بیشترین رطوبت در این دشت، متعلق به فصل زمستان و همزمان با بیشینه بارندگی در این منطقه می‌باشد. متوسط بارندگی دشت ۴۸۳ میلی‌متر است که بیشتر در اواخر آبان تا اواخر فروردین اتفاق می‌افتد» (اکبری چگنی، ۱۳۹۶: ۵۵-۵۲).

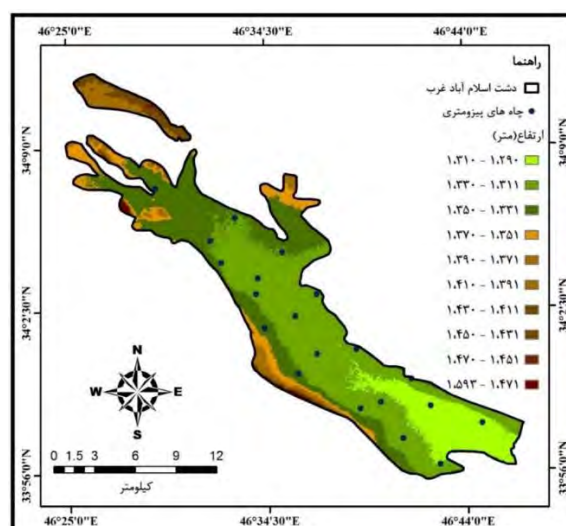


شکل (۱): موقعیت دشت اسلام‌آباد غرب در استان کرمانشاه و ایران

Figure (1): Location of Eslamabad-e Gharb plain in Kermanshah province and Iran

داده‌ها

داده‌های مشاهداتی مورد استفاده در این پژوهش، شامل دو دسته است: دسته اول، داده‌های ماهانه بارش ایستگاه سینوپتیک اسلام‌آباد غرب در یک دوره ۲۰ ساله (۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۶-۱۳۹۵) که از اداره کل هواشناسی استان کرمانشاه اخذ شده است، و دسته دوم، داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی ۲۰ حلقه چاه پیزومتری این دشت (شکل ۲) در همان دوره ۲۰ ساله، که از سازمان آب منطقه‌ای استان کرمانشاه دریافت گردیده است.



شکل (۲): مدل رقومی ارتفاعی و موقعیت چاه‌های پیزومتري دشت اسلام‌آباد غرب

Figure (2): Digital elevation model and position of piezometric wells in Eslamabad-e Gharb plain

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص‌های خشک‌سالی یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای پایش خشک‌سالی است. یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشک‌سالی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است (گوموس^۱، ۲۰۲۳: ۱) که کارایی آن در تجزیه و تحلیل دوره‌های مرطوب و خشک ثابت شده است (لورنزو و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). پس از جمع‌آوری داده‌های بارش منطقه، به منظور تعیین وضعیت خشک‌سالی و ترسالی هواشناسی، از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه استفاده شد. از طریق محاسبه این شاخص می‌توان فراوانی رویدادهای بسیار خشک یا مرطوب را در یک مقیاس زمانی خاص برای هر مکانی که سری داده‌های بارش آن در دسترس است، تعیین کرد (گوتمن^۳، ۱۹۹۹: ۳۱۱). بر پایه این شاخص، خشک‌سالی زمانی آغاز می‌شود که مقدار SPI به‌طور مداوم منفی باشد و به مقدار -۱ یا کمتر برسد، و زمانی خاتمه می‌یابد که مقدار آن مثبت شود (سبنیک^۴ و همکاران، ۲۰۱۷: ۳۴).

SPI یک شاخص خشک‌سالی هواشناسی مشهور است که صرفاً بر اساس داده‌های بارش پایه‌گذاری شده است. همانند شاخص درصد نرمال (PN)، شاخص بارش استاندارد شده میزان بارش را با میانگین چند سال آن مقایسه می‌کند. شاخص بارش استاندارد شده بر اختلافات ناشی از استفاده از توزیع غیراستاندارد، از طریق تبدیل توزیع بارش‌های ثبت‌شده به توزیع نرمال، غلبه می‌کند. برای این کار، بارش‌های ثبت‌شده ابتدا به یک توزیع گاما برازش داده می‌شود، سپس با استفاده از یک تبدیل احتمال-برابر^۵ به یک توزیع نرمال تبدیل می‌شود. سپس میانگین بر روی صفر تنظیم می‌شود و به این ترتیب مقادیر بالاتر از صفر نشان‌دهنده دوره‌های مرطوب و مقادیر زیر صفر نشان‌دهنده دوره‌های خشک است (زرگر و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۳۶). شاخص بارش استاندارد شده (SPI) از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$SPI = \frac{D_{YM} - \mu_{DM}}{\delta_{DM}} \quad (1)$$

که در آن D_{YM} ارتفاع بارش در سال Y و μ_{DM} و δ_{DM} به ترتیب میانگین و انحراف معیار ارتفاع بارش‌ها در ماه M است (شکاری و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۲). بر اساس شاخص SPI می‌توان برای هر سال یا هر دوره مورد نظر، ۷ حالت مختلف (جدول ۱) را مشخص کرد که نشان‌دهنده وضعیت آب‌وهوایی آن دوره در همان زمان مورد نظر است (علیزاده، ۱۳۹۴: ۲۸۳).

1- Gumus
2- Lorenzo

3- Guttman
4- Šebenik

5- equal-probability transformation
6- Zargar

جدول (۱): طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI (منبع: علیزاده، ۱۳۹۴)

Table (1): Classification of drought based on SPI (source: Alizadeh, 2014)

وضعیت آب‌وهوایی	شاخص SPI
شدیداً مرطوب	۲ و بیشتر
بسیار مرطوب	بین ۱/۵ تا ۱/۹۹
مرطوب متوسط	بین ۱ تا ۱/۴۹
نزدیک نرمال	بین ۰/۹۹ تا ۰/۹۹
خشک متوسط	بین ۱- تا ۱/۴۹-
بسیار خشک	بین ۱/۵- تا ۱/۹۹-
شدیداً خشک	۲- و کمتر

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت مورد نظر، با استفاده از میانگین داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی ۲۰ حلقه چاه پیرومتری موجود در دشت، از شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) استفاده شد. این شاخص برای ارزیابی وضعیت مخزن سفره آب زیرزمینی و محاسبه دوره‌های خشکسالی آب زیرزمینی ارائه شده است. به این منظور، همانند شاخص SPI، داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت اسلام‌آباد غرب در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شد. طبقات شاخص GRI همانند شاخص SPI (جدول ۱) است. هرچه مقادیر آن از ۲+ بیشتر باشد، ترسالی شدیدتر و هرچه از ۲- کمتر باشد، خشکسالی شدیدتر خواهیم داشت (مندیسینو و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۸۵). شاخص GRI از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$GRI = \frac{D_{YM} - \mu_{DM}}{\delta_{DM}} \quad (2)$$

که در آن D_{YM} مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سال Y ، μ_{DM} و δ_{DM} میانگین و انحراف معیار مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ماه M است (شکاری و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۲).

رابطه بارش و آب زیرزمینی و پیش‌بینی وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی

به منظور بررسی تأثیر خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها بر منابع آب زیرزمینی دشت اسلام‌آباد غرب در طول دوره آماری ۲۰ ساله (۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۶-۱۳۹۵)، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. ضرایب همبستگی پیرسون بین دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و منبع آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس‌های زمانی مختلف به صورت همزمان و نیز به منظور به دست آوردن تأخیر زمانی تأثیر بارش بر سطح آب زیرزمینی، با تأخیرهای زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه در شاخص GRI محاسبه شد. همچنین به منظور پیش‌بینی وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی، اطلاعات بارش آینده دشت با چهار مدل گردش عمومی جو گزارش ششم (CMIP6)، شامل مدل‌های CESM2 (ایالات متحده آمریکا)، CanESM5-CanOE (کانادا)، CNRM-CM6-1 (فرانسه) و MERI-ESM2-0 (ژاپن) تحت سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج و با مدل SDSM ریزمقیاس‌نمایی شد.

CMIP6 آخرین مرحله از همکاری ذیل پروژه مقایسه مدل جفت‌شده (CMIP) است. داده‌های CMIP6 جدیدترین داده‌های مدل آب‌وهوای جهانی موجود است و پایه و اساس ششمین گزارش ارزیابی تغییرات آب‌وهوایی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم را فراهم می‌کند. مدل‌های CMIP6 عموماً دارای پیچیدگی (اجزاء بیشتر) و وضوح فضایی بالاتر هستند و از مجموعه پیشرفته‌ای از سناریوهای انتشار

استفاده می‌کنند که مبتنی بر مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) هستند^۱. SDSM یکی از ابزارهای ریزمقیاس‌نمایی آماری است که برای ارزیابی آثار محلی تغییر اقلیم توسعه داده شده است. این مدل که هسته اصلی آن تلفیقی از روش‌های تصادفی و رگرسیون است، با هدف تبیین حداکثری تغییرپذیری اقلیم محلی (پیش‌بینی شونده) یک ایستگاه از تأثیرگذارترین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده) طراحی شده است. ورودی این مدل، داده‌های دیده‌بانی روزانه ایستگاه (پیش‌بینی شونده)، متغیرهای بزرگ‌مقیاس NCEP (پیش‌بینی‌کننده) در دوره مشابه دیده‌بانی و برون‌داد متغیرهای بزرگ‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار گوناگون برای دوره مطالعاتی آینده است (ویل‌بای و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۴۷).

در مرحله بعد، با توجه به مقادیر شاخص‌های صحت‌سنجی، داده‌های مدل CanESM5-CanOE (کانادا) انتخاب و وارد رابطه رگرسیونی بارش با سطح آب زیرزمینی گردید. به این منظور از داده‌های روزانه دوره پایه (۱۹۸۷ تا ۲۰۰۵) ایستگاه سینوپتیک اسلام‌آباد غرب و داده‌های مشاهداتی مربوط به مرکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) استفاده شد. به منظور مشخص کردن دوره‌های خشکسالی و ترسالی، داده‌های تولیدشده در مقیاس‌های زمانی مختلف به نرم‌افزار DIP وارد شد. از آنجایی که بیشترین ارتباط بین دو شاخص SPI و GRI، مربوط به سری زمانی ۴۸ ماهه بود، از این رو نمرات استانداردشده بارش آینده برای هر سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سری زمانی ۴۸ ماهه وارد مدل رگرسیونی رابطه بارش با سطح آب شد و وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی بر پایه شاخص GRI برآورد گردید. آینده‌نگری بر پایه مدل‌های جدید گزارش ششم و ورود بحث تأخیرهای زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه به مطالعه رابطه دو شاخص SPI و GRI برای پی‌بردن به میزان تأخیر زمانی بین این دو از نقاط قوت پژوهش حاضر می‌تواند به شمار آید.

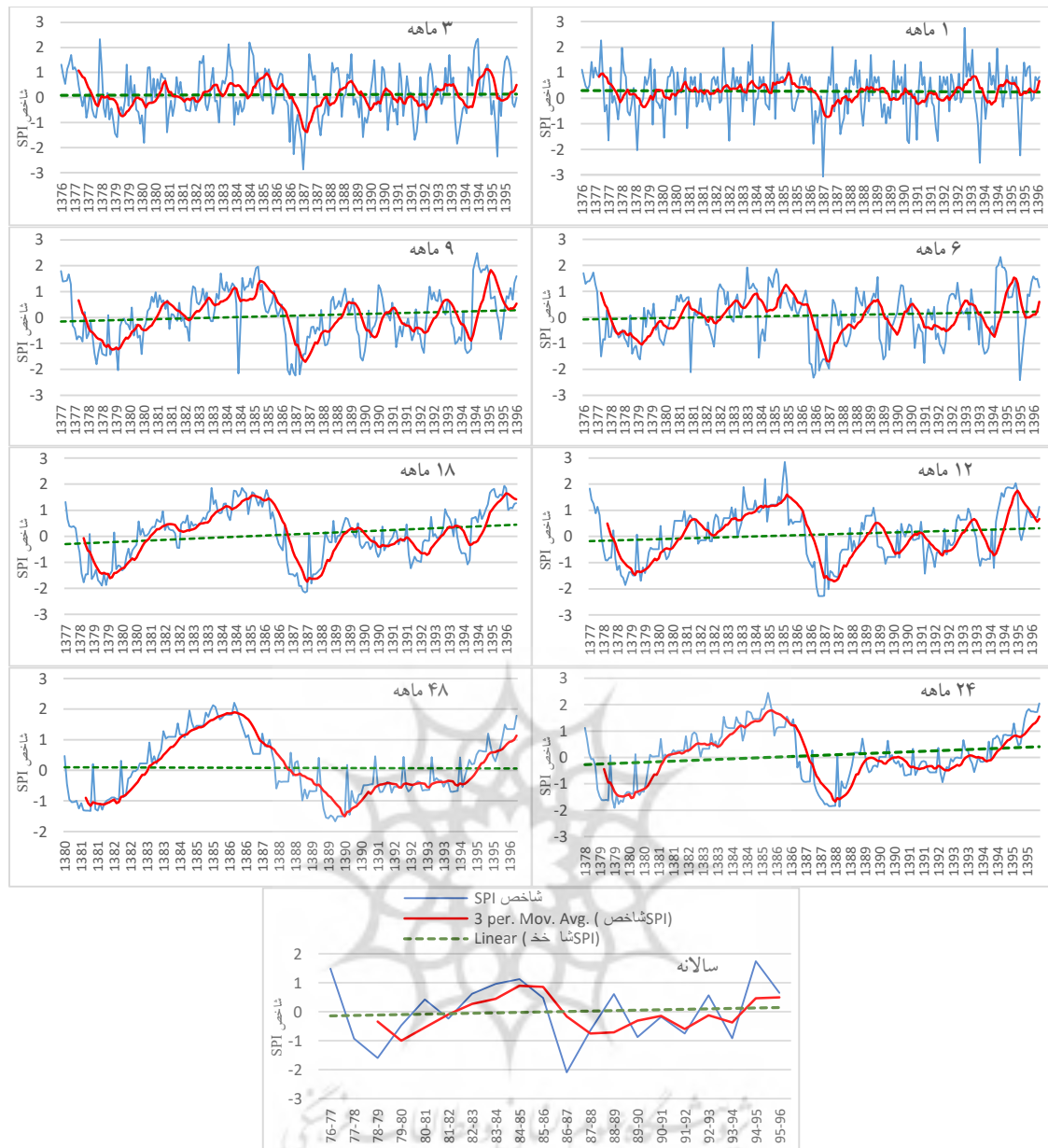
یافته‌ها

تحلیل خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هواشناسی و نوسانات سطح آب زیرزمینی

همان‌طور که در روش تحقیق عنوان شد، به منظور مشخص کردن دوره‌های خشکسالی و ترسالی هواشناسی و وضعیت نوسان سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، دو شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و منبع آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شد. نتایج به دست آمده از شاخص SPI در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با گذشت سال‌ها، بی‌نظمی زمانی بارش‌ها نمود بیشتری پیدا می‌کند و در مقیاس‌های زمانی میان مدت تعداد و نوسان خشکسالی‌های هواشناسی بیشتر می‌شود. در طی دوره آماری مورد نظر در بیشتر سال‌ها مقدار بارش در منطقه نزدیک به حالت نرمال بوده است. اما آنچه که از نمودارهای درازمدت (۴۸ ماهه) و نیز دوره سالانه مشخص است، این است که وضعیت خشکسالی و ترسالی در منطقه به مرور زمان حالت سینوسی پیدا کرده است. به نحوی که از ابتدای دوره آماری تا سال ۱۳۸۳ منطقه در وضعیت خشکسالی به سر برده است. سپس بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۸ به مدت حدود ۵ سال به وضعیت ترسالی تغییر حالت داده و این حالت ترسالی در سال ۱۳۸۶ به اوج خود رسیده است. مجدداً بین سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵ به مدت حدود ۷ سال وضعیت خشکسالی حاکم شده است. اوج خشکسالی در سال ۱۳۸۸ بوده است. از سال ۱۳۹۵ به بعد تا آخر دوره آماری مجدداً وضعیت ترسالی در منطقه حاکم شده است.

1 - <https://climatedata.ca/resource/cmip6-faq/>

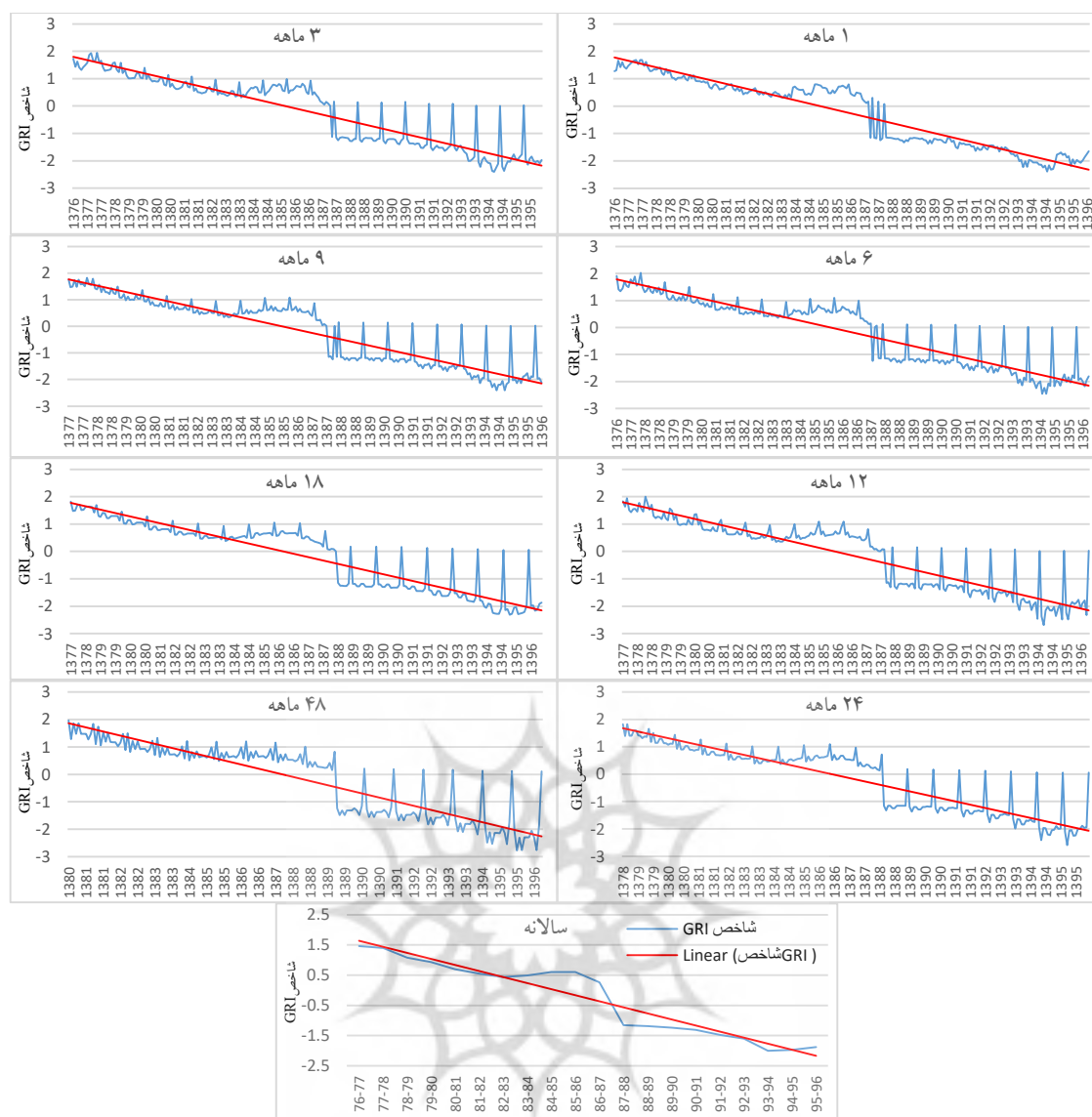
2- Wilby



شکل (۳): تغییرات شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه و سالانه

Figure (3): Changes in Standardized Precipitation Index (SPI) in time scales of 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, and 48 months and annually

نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی در منطقه بر پایه شاخص GRI در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس شکل، در دشت اسلام‌آباد غرب از ابتدای دوره آماری سطح آب در تمام سری‌های زمانی از یک روند نامنظم نزولی برخوردار بوده است. به گونه‌ای که سطح آب در ابتدای دوره آماری در بالاترین و در انتهای دوره آماری در پایین‌ترین مقدار خود قرار داشته است. تقریباً در تمام دوره‌های زمانی، از شروع دوره آماری تا حوالی سال ۱۳۸۳ روند منظم کاهش سطح آب ادامه داشته است. از سال ۱۳۸۳ تا حدود سال ۱۳۸۷ این روند متوقف و در عوض به روند ملایم افزایشی تغییر وضعیت داده و سپس از سال ۱۳۸۷ تا آخر دوره آماری مجدداً روند کاهشی از سر گرفته شده است. سال ۱۳۸۷ تقریباً سال چرخش وضعیت سطح آب زیرزمینی از حالت تر سالی به حالت خشک سالی است. شدیدترین خشکسالی‌های آب زیرزمینی در انتهای دوره آماری، بین سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۶ اتفاق افتاده است.



شکل (۴): تغییرات شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه و سالانه

Figure (4): Changes of the Groundwater Resource Index (GRI) in the time scales of 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 and 48 months and annually

تحلیل رابطه شاخص‌های SPI و GRI

پس از محاسبه نمرات استاندارد شده بارش و سطح آب زیرزمینی، همبستگی پیرسون بین این دو شاخص با نرم‌افزار SPSS محاسبه شد. در این نرم‌افزار، نمرات استاندارد شده بارش به عنوان متغیر مستقل و نمرات استاندارد شده سطح آب زیرزمینی به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از آزمون همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه در جدول ۲ نشان داده شده است. ضرایب معنی‌دار در جدول به رنگ کرم مشخص شده است.

جدول (۲): ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف

Table (2): Pearson correlation coefficients between SPI and GRI in different time scales

شاخص	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 9	SPI 12	SPI 18	SPI 24	SPI 48
GRI 1	۰/۰۲	-۰/۰۱۹	-۰/۰۴۸	-۰/۰۴۶	-۰/۰۳۱	-۰/۰۴۶	۰/۰۲۳	۰/۲۷۶**
GRI 3	۰	۰/۰۳۸	-۰/۰۶۴	-۰/۰۵۴	-۰/۰۵۱	-۰/۰۴۸	۰/۰۰۸	۰/۲۵۲**
GRI 6	-۰/۰۰۶	-۰/۰۶۲	-۰/۰۲۹	-۰/۰۵۹	-۰/۰۵۸	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۲۵۸**
GRI 9	-۰/۰۰۸	-۰/۰۶۷	-۰/۰۱۳۱*	-۰/۰۱۶۷*	-۰/۰۸۲	-۰/۰۱۰۸	-۰/۰۲۱	۰/۲۴۹**
GRI 12	-۰/۰۰۱	-۰/۰۹۶	-۰/۰۱۶۱*	-۰/۰۲۰۸**	-۰/۰۷۳	-۰/۰۱۴۱*	-۰/۰۰۷	۰/۳۱۹**
GRI 18	-۰/۰۵۲	-۰/۰۱۳	-۰/۰۱۳۱	-۰/۰۲۱۴**	-۰/۰۲۰۲**	-۰/۰۱۳۸*	-۰/۰۱۰۸	۰/۲۲۲**
GRI 24	۰/۰۰۳	-۰/۰۱۰۲	-۰/۰۱۷۳*	-۰/۰۵۸	-۰/۰۱۴۵*	-۰/۰۲۳۸**	-۰/۰۰۷۹	۰/۲۸۲**
GRI 48	۰/۰۷۳	۰/۰۰۶	-۰/۰۲۷	-۰/۰۴۶	-۰/۰۴۴	-۰/۰۶۲	۰/۰۲۳	۰/۱۹۵**

* همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۵ ** همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۱

پایین بودن ضرایب همبستگی بین دو شاخص SPI و GRI می‌تواند به دو دلیل باشد: اول اینکه نفوذ آب ناشی از ذوب برف به اعماق زمین و پیوستن آن به آب‌های زیرزمینی، به‌طور معمول با تأخیر همراه است. دوم اینکه مقدار بارش ماهانه و مقدار برداشت از آب‌های زیرزمینی آهنگ منظمی ندارند. به همین دلیل، این بار سری‌های زمانی شاخص GRI با تأخیرهای زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه در مقابل سری‌های زمانی شاخص SPI قرار گرفت و ضرایب همبستگی آن‌ها محاسبه شد. نتایج حاصل از محاسبه ضرایب همبستگی بین این دو شاخص در شرایط تأخیر زمانی در جدول ۳ ارائه شده است. ضرایب معنی‌دار به رنگ کرم مشخص شده است.

جدول (۳): ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPI و GRI در شرایط تأخیر زمانی

Table (3): Pearson correlation coefficients between SPI and GRI with different time delays

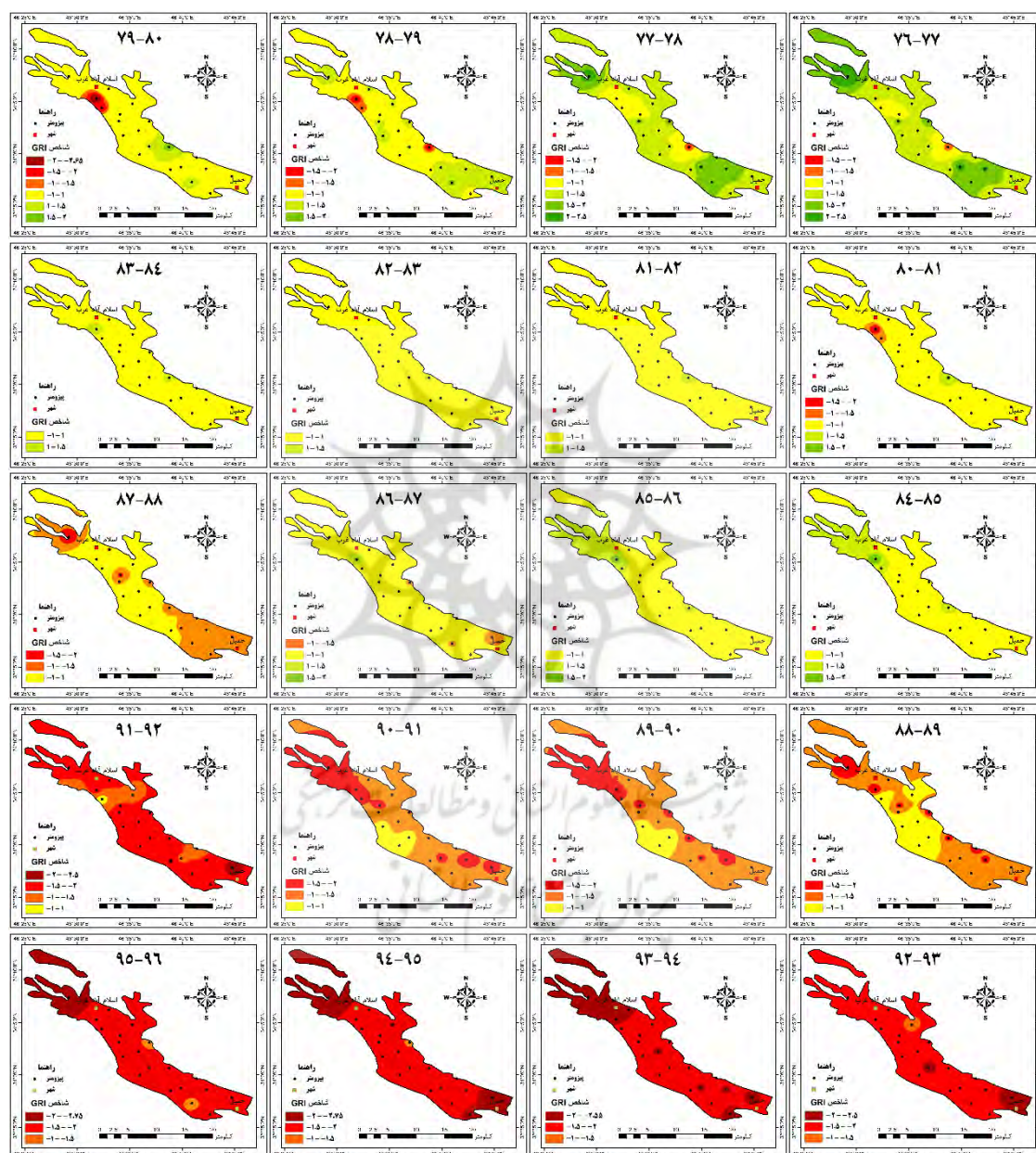
SPI 48	SPI 24	SPI 18	SPI 12	SPI 9	SPI 6	SPI 3	SPI 1	GRI دوره با تأخیر (ماه)
۰/۱۴۹*	-۰/۰۱۱۳	-۰/۰۱۶۴*	-۰/۰۰۷	-۰/۰۸۲	-۰/۰۵۹	-۰/۰۱۶	۰/۰۲۲	۱
۰/۰۱۶۷*	-۰/۰۸۴	-۰/۰۱۳۷*	-۰/۰۰۹۳	-۰/۰۰۶۴	-۰/۰۰۳۵	-۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۵	۲
۰/۰۱۸۸**	-۰/۰۵۸	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۷۷	-۰/۰۰۴۹	-۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۴۸	۳
۰/۰۲۱۱**	-۰/۰۰۳۰	-۰/۰۰۸۴	-۰/۰۰۵۷	-۰/۰۰۴۲	۰	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۳۳	۴
۰/۰۲۳۶**	۰	-۰/۰۰۷۵	-۰/۰۰۳۸	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۷	۵
۰/۰۲۵۷**	۰/۰۰۲۳	-۰/۰۰۶۶	-۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۰۷	۶
۰/۰۲۷۳**	۰/۰۰۴۶	-۰/۰۰۴۴	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۰۷	۷
۰/۰۲۸۷**	۰/۰۰۶۹	-۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۹۷	۸
۰/۰۲۹۵**	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۸۶	۹
۰/۰۳۰۰**	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۸۵	۱۰
۰/۰۳۱۳**	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۹۳	۱۱
۰/۰۳۸۵**	۰/۰۰۸۹**	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۳۲*	۰/۰۰۰۸	۱۲

* همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۵ ** همبستگی معنادار در سطح ۰/۰۱

نتایج محاسبات در جدول ۳ نشان‌دهنده ارتباط شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس زمانی بلندمدت است که بیشترین همبستگی میان SPI ۴۸ ماهه و GRI ۴۸ ماهه در گام تأخیر ۱۲ ماهه با ضریب همبستگی ۰/۳۸۵ در سطح معناداری ۰/۰۱ مشاهده می‌شود. در شرایط همزمان نیز، بیشترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس‌های زمانی بلندمدت و بین دو شاخص SPI ۴۸ ماهه و شاخص GRI ۱۲ ماهه به میزان ۰/۳۱۹ محاسبه شده است که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است. لذا کاهش بارش در زمان‌های طولانی‌تر، اثرات قابل توجهی بر کاهش سطح آب زیرزمینی دارد.

پهنه‌بندی سالانه خشکسالی هیدروژئولوژیک

با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، سطح منطقه از نظر وضعیت سطح آب ۲۰ حلقه چاه پی‌زومتری، و از آنجا مقادیر شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) در تمام سال‌های دوره آماری با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی شد. برای این کار از روش کریجینگ معمولی به دلیل دقت بالاتری که در برآورد عمق سطح ایستابی داشت، استفاده گردید. نقشه‌های پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این نقشه‌ها، طبقات راهنمای علائم در هر نقشه، بر اساس طبقات شاخص GRI در جدول ۱ تعیین شده است.

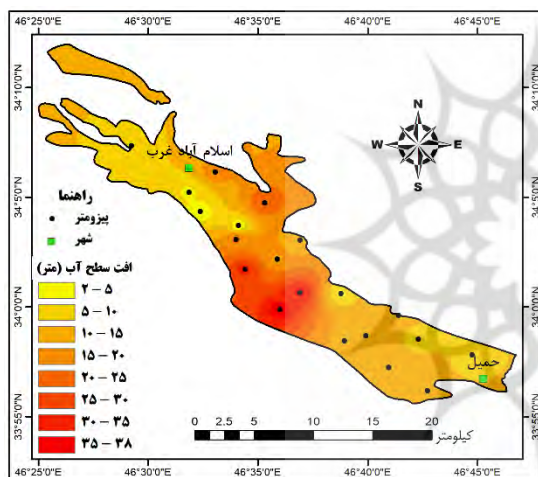


شکل (۵): ارزش شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) دشت اسلام‌آباد غرب طی سال‌های دوره آماری

Figure (5): The value of the Groundwater Resource Index (GRI) of Islamabad-e Gharb Plain during the years of the statistical period

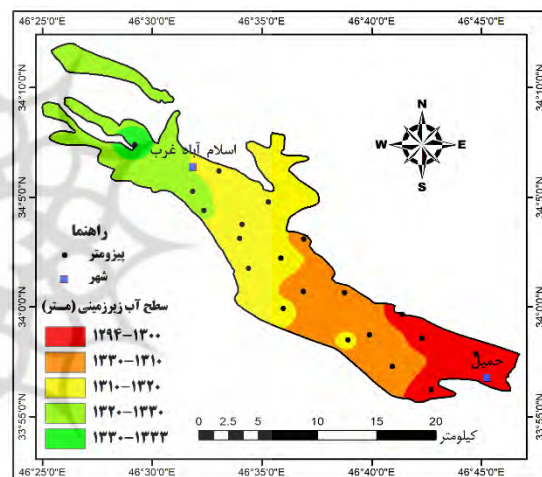
با توجه به نقشه‌های شکل ۵ و طیف رنگ به کار برده شده در طبقات نقشه‌ها، تغییر حالت از ترسالی به خشکسالی در منطقه از سال‌های ابتدایی دوره آماری به طرف سال‌های پایانی کاملاً مشهود است. به نحوی که از ارقام SPI بین ۲ تا ۲/۵ در سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ به ارقام SPI بین ۲- تا ۲/۵- در سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ می‌رسیم.

به منظور پی بردن به وضعیت درازمدت نوسان سطح آب، نقشه پهنه‌بندی میانگین سطح آب زیرزمینی (ایزوپیچ) دشت اسلام‌آباد غرب در دوره ۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۶-۱۳۹۵ با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به روش کریجینگ معمولی رسم شد که نتیجه در شکل ۶ نشان داده شده است. بر پایه این شکل، بالاترین میزان سطح آب زیرزمینی مربوط به قسمت‌های شمالی دشت به میزان ۱۳۳۰ الی ۱۳۳۳ متر، و پایین‌ترین آن مربوط به مناطق جنوبی دشت حوالی حمیل به میزان ۱۲۹۴ الی ۱۳۰۰ متر است. همچنین نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول دوره آماری (۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۶-۱۳۹۵) با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به روش کریجینگ معمولی رسم شد (شکل ۷). با توجه به شکل، در همه جای دشت، سطح آب زیرزمینی در دوره آماری به مرور زمان افت داشته و در هیچ ناحیه‌ای با افزایش سطح آب زیرزمینی روبه‌رو نبوده‌ایم. بیشترین میزان افت سطح آب در قسمت‌های میانی دشت با کاهشی در حدود ۲۵ الی ۳۸ متر در دوره آماری (به‌طور میانگین ۱/۲۵ الی ۱/۹ متر در هر سال) مربوط به سه چاه در حوالی روستاهای بورگ و سیاسیا شیخه بوده است. چاه‌های روستاهای برف‌آباد، بین برف‌آباد، ونائی و کله‌جوب از کمترین میزان نوسان در طول دوره آماری برخوردار بوده‌اند.



شکل (۷): میانگین افت سطح آب زیرزمینی بر حسب متر در دشت اسلام‌آباد غرب (۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۶-۱۳۹۵)

Figure (7): The average drop of the groundwater level in meters in Eslamabad-e Gharb plain (1997-98 to 2016-17)



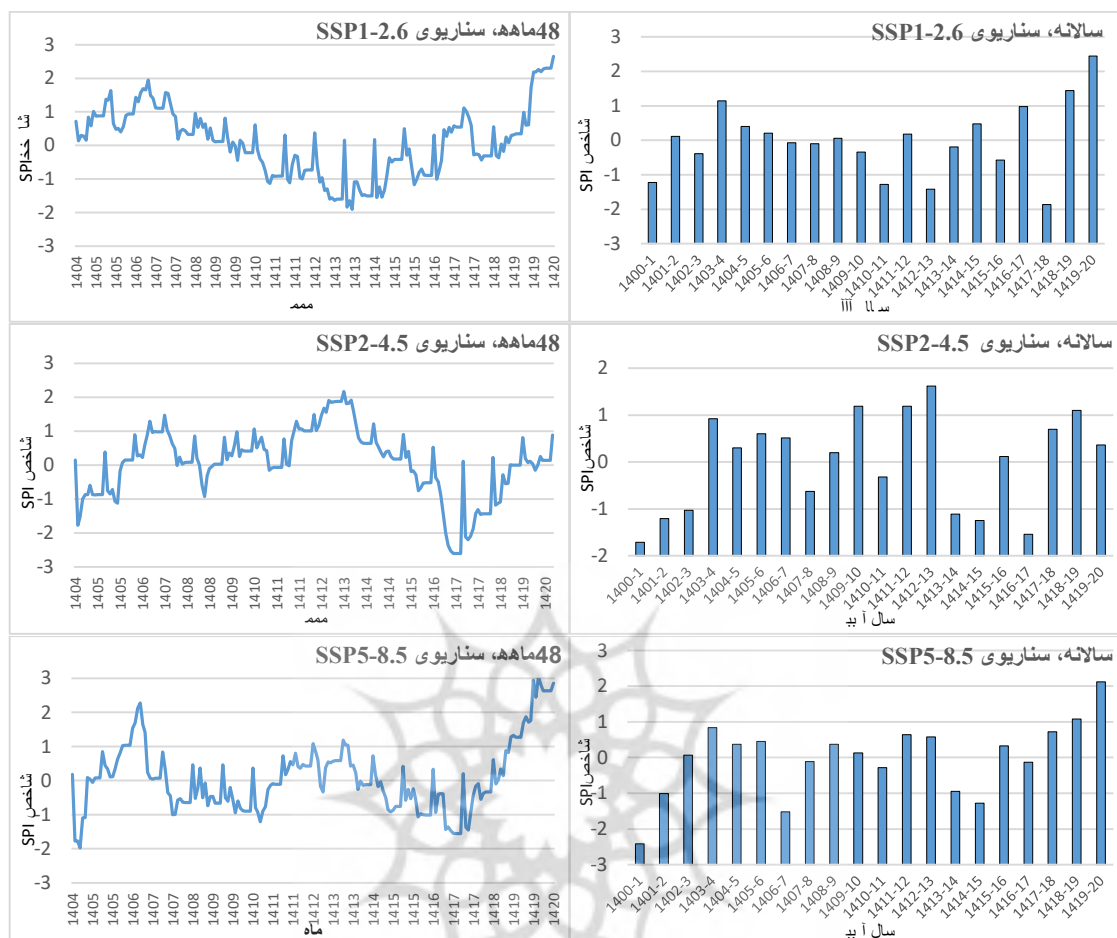
شکل (۶): میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی بر حسب متر در دشت اسلام‌آباد غرب (۷۷-۱۳۷۶ تا ۹۶-۱۳۹۵)

Figure (6): The average elevation of the groundwater level in meters in Eslamabad-e Gharb Plain (1997-98 to 2016-17)

پیش‌بینی وضعیت آینده بارش با استفاده از مدل CanESM5-CanOE و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

همانطور که گفته شد، از آنجایی که بیشترین ارتباط بین دو شاخص SPI و GRI، مربوط به سری زمانی ۴۸ ماهه بود، داده‌های تولیدشده در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه و همچنین مقیاس سالانه، به منظور مشخص کردن دوره‌های خشکسالی و ترسالی به نرم‌افزار DIP وارد شد. نتایج حاصل از بررسی شاخص SPI سالانه و ۴۸ ماهه برای دوره آینده (سال‌های آبی ۰۱-۱۴۰۰ تا ۲۰-۱۴۱۹) در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای این شکل و همانند نمودارهای SPI مشاهداتی، در هر سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با یک وضعیت سینوسی در آینده روبرو هستیم. از شروع دوره، یعنی سال ۱۴۰۰، تا انتهای نیمه اول دوره آینده، یعنی حوالی سال ۱۴۱۱، وضعیت‌های متناوب ترسالی و خشکسالی را شاهد هستیم. اما در نیمه دوم، بین سال‌های ۱۴۱۴ تا ۱۴۱۸ ابتدا یک دوره خشکسالی که در سال ۱۴۱۷ به اوج خود خواهد رسید، دیده می‌شود. سپس از سال ۱۴۱۸ به بعد خشکسالی رخ

خواهد داد که با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده بارش و وضعیت کیفی هر سه سناریو، مقدار کاهش بارش و کاهش ارزش شاخص SPI برای سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 به خصوص در سال‌های پایانی دوره محسوس‌تر خواهد بود.

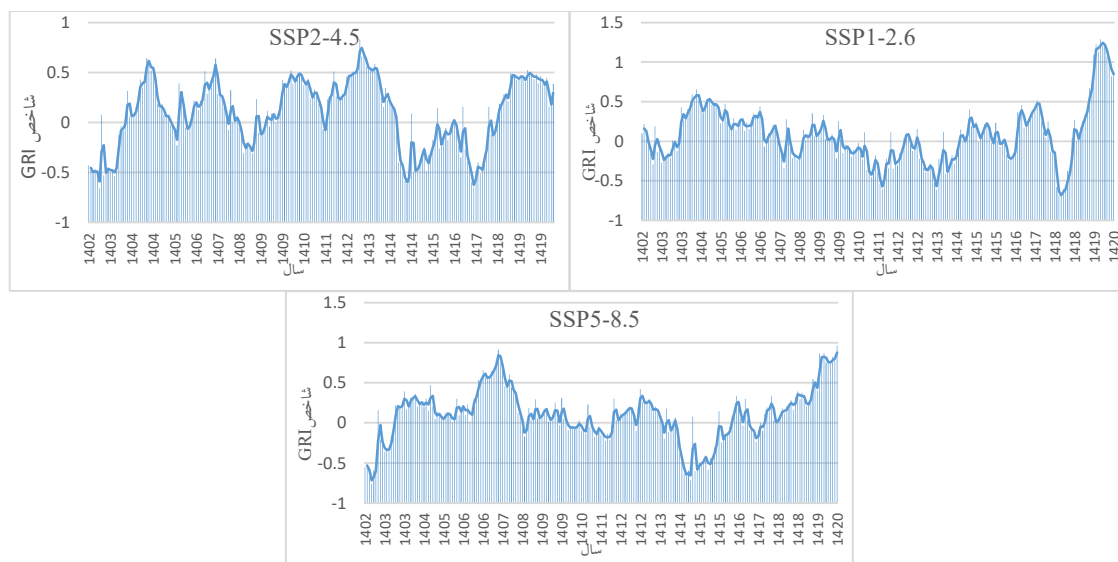


شکل (۸): تغییرات سالانه و ۴۸ ماهه شاخص SPI در ایستگاه اسلام‌آباد غرب در دوره آتی (۱۴۰۰-۲۰ تا ۱۴۱۹) با مدل CanESM5-CanOE تحت سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Figure (8): Annual and 48-month changes of SPI at Eslamabad-e Gharb station in the future period (2021-22 to 2040-41) with CanESM5-CanOE model under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5

پیش‌بینی وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی با رگرسیون خطی

با وارد کردن نمرات استاندارد شده بارش آینده سری زمانی ۴۸ ماهه مربوط به هر سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به مدل رگرسیونی رابطه بارش با سطح آب (با توجه به ضرایب همبستگی معنادار جدول ۳)، وضعیت آینده سطح آب زیرزمینی بر پایه شاخص GRI در سری زمانی ۴۸ ماهه برآورد گردید. نتایج مربوطه در شکل ۹ مشاهده می‌شود. بر پایه این شکل، به تبع کاهش میزان بارش، در مقاطعی از دوره آینده، مانند سال‌های ۱۴۰۹ تا ۱۴۱۴ در سناریوی SSP1-2.6، و سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۱۴ و ۱۴۰۳ تا ۱۴۱۴ در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، با افت سطح آب زیرزمینی روبه‌رو خواهیم بود. نمرات پیش‌بینی شده شاخص GRI ۴۸ ماهه سطح آب زیرزمینی برای هر سه سناریو، پس از محاسبه مقدار عددی سطح آب زیرزمینی، نشان‌دهنده کاهش میزان سطح آب در آینده برای سناریوی انتشار SSP1-2.6 به مقدار ۵/۱۷، برای سناریوی انتشار SSP2-4.5 به مقدار ۶/۰۲ و برای سناریوی انتشار SSP5-8.5 به میزان ۸/۰۸ متر است.



شکل (۹): تغییرات ۴۸ ماهه شاخص GRI در ایستگاه اسلام‌آباد غرب در دوره آتی (۱۴۰۰-۱ تا ۱۴۱۹-۲۰) تحت سه سناریوی انتشار SSP2-4.5، SSP1-2.6 و SSP5-8.5

Figure (9): 48-month changes of the GRI at Eslamabad-e Gharb station in the future period (2021-22 to 2040-41) under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5

بحث

بررسی رابطه بین بارش و سطح آب زیرزمینی با آنالیزهای آماری در دشت مورد مطالعه (جداول ۲ و ۳) نشان داد که بیشترین همبستگی بین دو شاخص SPI و GRI در مقیاس‌های زمانی بلندمدت اتفاق می‌افتد، تا آنجا که مقدار ضریب همبستگی در حالت تأخیر زمانی نسبت به شرایط همزمان بسیار بیشتر است. همچنین بیشترین تأثیر افزایش یا کاهش بارش بر هرگونه تغییر در سطح آب زیرزمینی در سری زمانی ۴۸ ماهه و گام تأخیر ۱۲ ماهه اتفاق افتاد. شرایط فوق نشان می‌دهد که تأثیر میان‌مدت و بلندمدت خشکسالی بر روی سطح آب زیرزمینی بسیار چشمگیرتر از کوتاه‌مدت است.

بیشترین میزان افت سطح آب در منطقه در دوره گذشته، مربوط به قسمت‌های میانی دشت با کاهشی در حدود ۲۵ الی ۳۸ متر در دوره آماری (به‌طور میانگین ۱/۲۵ الی ۱/۹ متر در سال) است که تقریباً با میزان افت محاسبه شده در دشت ششده و قره‌بلاغ استان فارس به‌میزان متوسط ۱/۷۶ متر در سال (شکاری و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۹) و دشت خرم‌آباد در استان لرستان به‌میزان متوسط ۱ تا ۱/۵ متر در سال (دهقانی و همکاران، ۱۴۰۳: ۱) مطابقت دارد و به نوعی نشان‌دهنده اوضاع بحرانی آب‌های زیرزمینی در دشت‌های مختلف کشور و یا دست‌کم در قسمت‌هایی از این دشت‌هاست. البته در بخش‌هایی از دشت اسلام‌آباد غرب میزان افت کمتر و در حد ۰/۱ الی ۱ متر در سال است که این نیز با افت سطح آب محاسبه شده در دشت گرگان به میزان ۰/۱۵ متر در سال (کریمی راد و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۶۱)، دشت کرمان به میزان ۰/۷۸ متر در سال (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۱)، دشت صفی‌آباد شهرستان اسفراین به میزان ۰/۳۲ متر در سال (مقامی مقیم و تقی‌پور، ۱۳۹۸: ۲۷)، و دشت داراب به میزان ۱/۳۵ متر در سال (خورانی و خواجه، ۱۳۹۳: ۵۷) مطابقت دارد. بر پایه پیش‌بینی‌های انجام‌شده، در مقطعی از «دوره آینده» نیز به دلیل کاهش بارش، میانگین سطح آب زیرزمینی کمابیش افت خواهد کرد. مقدار این افت بین ۵/۱۷ تا ۸/۰۸ متر خواهد بود. در دشت مورد پژوهش هیچ نقطه‌ای با افزایش سطح آب زیرزمینی مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری

درک اهمیت آب‌های زیرزمینی برای پیشبرد مؤثر اهداف توسعه پایدار حیاتی است. آب‌های زیرزمینی نقش مهمی در حفظ اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کنند و برای توسعه انسانی اهمیت زیادی دارند. با این حال، مطالعه تغذیه آب‌های زیرزمینی در مقایسه با هیدرولوژی آب‌های سطحی توجه کمتری را به خود جلب کرده است، زیرا اکتشاف آن عمدتاً به مقیاس‌های زمانی کوتاه محدود شده است. رژیم‌های بارندگی و تغییر کاربری زمین/ پوشش زمین می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی داشته باشد و در نتیجه بر دسترسی به منابع آب و ارائه بی‌وقفه خدمات اکوسیستم تأثیر بگذارد (دیوداتو و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). در این بین خشکسالی اثرات ویژه‌ای بر مقدار و نوسانات سطح آب زیرزمینی دارد. ارزیابی خشکسالی برای به حداقل رساندن پیامدهای منفی آن و طراحی استراتژی‌های مناسب مدیریتی مهم است (نیگوسه دژنه و همکاران، ۲۰۲۳: ۱). برای رسیدن به یک وضعیت پایدار از نظر سطح و حجم آب‌های زیرزمینی، باید اثر تمام عوامل از جمله خشکسالی‌ها بر روی نوسانات آب زیرزمینی بررسی شود. از این رو در این مطالعه سعی شده است تا تأثیرات خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها بر سطح آب زیرزمینی دشت اسلام‌آباد غرب در استان کرمانشاه، که یک دشت مهم از نظر فعالیت‌های کشاورزی در غرب کشور است و در سال‌های اخیر شاهد توسعه فعالیت‌های کشاورزی بوده است، بررسی شود. یافته‌های پژوهش حاضر بینش مناسبی را در مورد وضعیت فعلی آب زیرزمینی در این دشت، که قابل تعمیم به سایر دشت‌های کشور است، ارائه می‌دهد و بر اهمیت اجرای شیوه‌های مدیریت پایدار آب تأکید می‌کند.

صرف‌نظر از کم یا زیادبودن میزان افت آب زیرزمینی در دشت اسلام‌آباد غرب و سایر دشت‌های کشور و حتی گزارش افزایش جزئی در سطح آب‌های زیرزمینی در بخش‌هایی از مناطق مورد مطالعه، انگاره عمومی افت دائمی سطح آب‌های زیرزمینی در این دشت و سایر دشت‌های مهم کشور و تشدید آن در آینده به هم نمی‌خورد و لذا ایجاد بحران‌های محیطی گوناگون در آینده به صورت جدی مطرح است. گرچه در تحقیق حاضر ارتباط بین شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI) و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی (GRI) از نظر آماری معنی‌دار بود، اما مشابه کار کوبیژ و باک (۲۰۱۹: ۱۸۷) در لهستان، ضعف این ارتباط می‌تواند به تأثیر عواملی غیر از بارندگی، مانند افزایش میزان برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق برای مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی و شرب در تغییرات سطح آب و شاخص آب زیرزمینی (GRI) نیز مربوط شود. در نتیجه، با توجه به کاهش میزان بارش در مقاطعی از دوره آینده و نیز نقش سایر عوامل همچون برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، در صورت عدم توجه مستمر به این عوامل انسانی، سطح آب‌های زیرزمینی در آینده دچار افت شدیدی خواهد شد. از اینرو توجه مستمر و مداوم مسئولان و دستگاه‌های اجرایی به کاهش آثار عوامل انسانی در افت سطح آب زیرزمینی و انجام مطالعات بیشتر در این زمینه کاملاً ضروری است.

منابع

- Akbari Chegani, N. (2017). *Spatial analysis of the quality of the residential environment in the city of Eslamabad-e Gharb*. M.Sc. Thesis in urban planning, Hakim Sabzevari University.
- Alizadeh, A. (2014). *Principles of applied hydrology*. 40th edition, Mashhad: Imam Reza University Press.
- Behremand, A., Hamdami, Gh., & Saniei, I. (2014). Analysis of the trend of long-term changes in rainfall and discharge in the west of Lake Urmia. *Journal of Watershed Management Research*, 4 (8), 43-57.
- Baik, J., Park, J., Hao, Y., & Choi, M. (2022). Integration of multiple drought indices using a triple collocation approach. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 36 (4), 1177-1195. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02044-7>
- Bak, B., & Kubiak-Wojcicka, K. (2016). Assessment of Meteorological and Hydrological Drought in Torun (Central Poland Town) in 1971-2010 Based on Standardized Indicators, *3rd International Conference- Water Resources and Wetlands*, (pp. 164-170). Tulcea, Romania.

- Dehghani, R., Chamanpira, R., & Veyskarami, I. (2024). Investigating the Effects of Climate Change on Underground Water Sources (Case Study: Khorram Abad plain). *Iranian Water Researches Journal*, 18 (2). doi: [10.22034/iwrj.2024.14796.2607](https://doi.org/10.22034/iwrj.2024.14796.2607)
- Dibike, Y. B., & Coulibaly, P. (2005). Hydrologic Impact of Climate Change in the Saguenay Watershed: Comparison of Downscaling Methods and Hydrologic Models. *Journal of Hydrology*, 307 (1-4), 145-163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.012>
- Diodato, N., Bellocchi, G. (2024). Millennium-scale changes in the Atlantic Multidecadal Oscillation influenced groundwater recharge rates in Italy. *Commun Earth Environ*, 5, 56, 1-13. <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01229-6>
- Feng, K., Su, x., Zhang, G., Javed, T., & Zhang, Z. (2020). Development of a new integrated hydrological drought index (SRGI) and its application in the Heihe River Basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(10), 43-59. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03184-6>
- Ghosh, A., & Bera B. (2023). Estimation of groundwater level and storage changes using innovative trend analysis (ITA), GRACE data, and google earth engine (GEE) *Groundwater for Sustainable Development* 23, 101003. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101003>
- Gumus, V. (2023). Evaluating the effect of the SPI and SPEI methods on drought monitoring over Turkey. *Journal of Hydrology*, 626, Part B, 130386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130386>
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35 (2), 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Heydari Aghagol, M., Ghoami, E., & Rostami Barani, H. R. (2017). Finding potential groundwater resources using fuzzy logic (Case Study: South Khorasan province). *Iran-Water Resources Research*, 13 (1), 211-215.
- Jabraili Andarian, N., Nadiri, A. A., & Gharekhani, M. (2024). Investigating the quantity and quality of groundwater and its effect on the hydrogeochemistry of the Azarshahr plain aquifer and identifying the possible source of contamination. *Hydrogeomorphology*, 11(38), 60-79. doi: [10.22034/hyd.2024.58969.1710](https://doi.org/10.22034/hyd.2024.58969.1710)
- Jung, H., Won, J., Kang, S., & Kim, S. (2022). Characterization of the Propagation of Meteorological Drought Using the Copula Model. *Water*, 14 (20), 3293. <https://doi.org/10.3390/w14203293>
- Karimirad, I., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2015). Investigation of climate variability impacts on multilayer aquifers (Case study: Gorgan plain). *Water and Irrigation Management*, 5 (2), 261-275. <https://doi.org/10.22059/jwim.2015.57448>
- Khorani, A., & khajeh, M., (2014). An investigation on the coincidence between trend of drought and groundwater levels decline (A Case Study: Plain of Darab). *MJSP*, 18 (2) :57-80.
- Kubiak-Wojcicka, K., and Bak, B., (2018). Monitoring of Meteorological and Hydrological Droughts in the Vistula Basin (Poland). *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 190, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7058-8>
- Kubicz, J., & Bak, B. (2019). The Reaction of Groundwater to Several Months' Meteorological Drought in Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28 (1), 187-195. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81691>
- Kumar, P. (2022). Extreme droughts and corresponding Summer Monsoon: A Case Study of 2009 Indian Drought. *MAUSAM*, 74 (1): 83-104. <https://doi.org/10.54302/mausam.v74i1.5329>
- Kumar, A., Pal, L., & Yadav, S. M. (2017). Investigating Relationship between Standardized Precipitation Index and Grace-Derived Groundwater Anomalies in Madhya Pradesh, 22nd International Conference on Hydraulics, Water Resources & Coastal Engineering (HYDRO-2017), (pp. 1-8). Ahmedabad, India.
- Lorenzo, M. N., Pereira, H., Alvarez, I., & Dias J. M. (2024). Standardized Precipitation Index (SPI) evolution over the Iberian Peninsula during the 21st century. *Atmospheric Research*, 297: 107132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107132>
- Maghami Moghim, G., & Taghipour, A. A. (2022). Investigating the Effective Factors on Changing Groundwater Levels of Safi Abad Plain of Esfarayneh. *Desert Ecosystem Engineering*, 8 (22), 27-42. doi: <https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.22.11>

- Maleki, S., Nourani, V., & Najafi, H. (2024). New Z-Number-Based Method for Specialized Groundwater Vulnerability Assessment (Case studies: The Ardabil and Qorveh-Dehgolan plains). *Hydrogeomorphology*, 11(38), 98-122. doi: [10.22034/hyd.2024.59132.1713](https://doi.org/10.22034/hyd.2024.59132.1713)
- Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for Drought Monitoring and Forecasting in a Mediterranean Climate. *Journal of Hydrology*, 357 (3-4), 282-302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005>
- Meseguer-Ruiz, O., Serrano-Notivoli, R., Aránguiz-Acuña, A., Fuentealba, M., Nuñez-Hidalgo, I., Sarricolea, P., & Garreaud, R. (2023). Comparing SPI and SPEI to detect different precipitation and temperature regimes in Chile throughout the last four decades. *Atmospheric Research*, 297 (13):107085. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107085>
- Mohammadi, S., Naseri, F., & Nazaripour, H. (2018). Investigating the temporal variation and meteorological drought effect on groundwater resources in Kerman plain using SPI and GRI indices. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5 (1), 11-22. doi: <https://doi.org/10.22059/ije.2017.225328.434>
- Niguse Dejene, I., Kabite Wedajo, G., Bayissa, Y. A., Melese Abraham, A., & Getahun Cherinet, K. (2023). Satellite rainfall performance evaluation and application to monitor meteorological drought: a case of Omo Gibe basin, Ethiopia. *Natural Hazards*, Published Online 12 August 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06127-2>
- Šebenik, U., Brilly, M., & Šraj, M. (2017). Drought Analysis Using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Acta Geographica Slovenica*, 57 (1), 31-49. <https://doi.org/10.3986/AGS.729>
- Shekari, M. R., Sadatinejad, S. J., & Vali, A. A. (2022). Relationship between meteorological and hydrogeological drought in an arid area: (a case study of Sheshdeh and Gharebolagh plains). *Desert Ecosystem Engineering*, 6 (14), 79-90. <https://doi.org/10.22052/6.14.79>
- Tladi T. M., Ndambuki, J. M., & Salim, R.W. (2022). Meteorological drought monitoring in the Upper Olifants sub-basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 128 (1-2), 103273. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103273>
- Uddameri, V., Singaraju, S., & Hernandez, E. A. (2019). Is Standardized Precipitation Index (SPI) a Useful Indicator to Forecast Groundwater Droughts? -Insights from a Karst Aquifer. *Journal of the American Water Resources Association*, 55 (1), 70-88. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12698>
- Wetherald, R. T., & Manabe, S. (2002). Simulation of Hydrologic Changes Associated with Global Warming. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D19), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2001JD001195>
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM – A Decision Support tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. *Environmental Modelling and Software*, 17 (2), 145-157. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3)
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. L. (2011). A Review of Drought Indices. *Environmental Reviews*, 19 (1), 333-349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>