



Comparative Effects of Climate Variability and Anthropogenic Withdrawal on Groundwater Level Decline in Ardabil Plain

Majid Raoof^{1*}, Hosein Ghafari², Mojtaba Sookhtanlou³

1-Professor, Department of Water Engineering and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2-M. Sc. Graduated, Range and Watershed Dept., Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

3-Assoc. Prof., Department of water Engineering and Agriculture Management, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received:2026-02-08

Accepted:2026-08-31

Revised:2026-08-24

Published online:2026-09-21

* Corresponding author: majidraoof2000@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Exploitation, Climate Change, Drought, Ardabil Plain, Groundwater Resources

Introduction

Droughts cause a decrease in agricultural production, livestock losses, pasture destruction, soil erosion, and a decrease in groundwater levels. Also, human activities, especially excessive extraction of water resources, have a great impact on groundwater levels, which causes a great decrease in the amount of water resources, especially in arid and semi-arid regions of Iran. Therefore, in this study, the effects of recent droughts on the amount of extraction of groundwater resources in the Ardabil Plain have been investigated. During the past two decades, the frequency, intensity, and duration of droughts have increased due to climate change and the irregular distribution of precipitation. These factors have altered the hydrological balance in many plains of Iran, leading to a critical decline in renewable water resources. The Ardabil Plain, as one of the most important agricultural regions in the northwest of the country, has faced severe stress on groundwater reserves because of agricultural expansion and over-irrigation practices. Understanding the relationship between drought intensity and groundwater depletion can help determine appropriate management strategies such as recharge enhancement, controlled abstraction, and sustainable land and water use planning to mitigate the adverse consequences of prolonged droughts and ensure future water security in the region.

Materials and Methods

In order to investigate the severity of drought and the relationship between climatic and hydrological droughts, monthly and annual precipitation and groundwater data of the Ardabil Plain were used. In other words, in order to investigate the relationship between drought and the number of wells with groundwater resources, annual and monthly precipitation data of the Ardabil Plain for 45 years (1961-2006) were used, as well as annual hydrograph data for a period of 35 years (1971-2006) and monthly data for 20 years from 1986 to 2006. Also, the number of wells used in the plain from 1961 to 1981 was used. Finally, these effects were compared with the effect of increased extraction on the decline in groundwater levels in the Ardabil Plain. The severity and duration of droughts were calculated and investigated using conventional methods, and based on the results obtained, the relationship between groundwater and climatic droughts was evaluated. To study the relationship between drought and groundwater level fluctuations and perform calculations and analyses, correlation methods, linear regression, and the graphical and computational power of statistical softwares (Excel, SPSS) were used.

How to cite:

Raoof,M. Ghafari,H. Sookhtanlou,M. *Comparative Effects of Climate Variability and Anthropogenic Withdrawal on Groundwater Level Decline in Ardabil Plain*. Journal of Hydraulics and Water Science, 36 (2):1-12.<https://doi.org/10.22034/hws.2026.71640.1044>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Results and Discussion

The results showed that changes in groundwater levels have a negligible correlation with the annual rainfall of the Ardabil Plain ($R^2 = 0.005$) and an even lower correlation with simultaneous monthly rainfall ($R^2 = 0.16$). In contrast, groundwater level fluctuations show a strong inverse correlation with time ($R^2 = +0.90$) and a high positive correlation with the number of wells in the plain ($R^2 = 0.93$). Analysis of the 45-year rainfall record (1961–2006; 1340–1385) indicates the onset of a prolonged drought beginning in 1983 (1362). Interestingly, despite an overall increasing rainfall trend over this 23-year period, groundwater levels continued to decline. This persistent decline is attributed to the intensifying groundwater extraction driven by agricultural expansion. On average, the groundwater level has dropped by approximately 43 cm per year during the period between 1983 and 2006. These findings clearly demonstrate that human-induced factors, particularly the uncontrolled growth in the number of deep and semi-deep wells, have outweighed the natural variability of precipitation in controlling groundwater dynamics. The results further suggest that even moderate rainfall recovery during certain years cannot compensate for the long-term imbalance between recharge and abstraction. Consequently, the Ardabil Plain is moving toward a critical condition characterized by aquifer depletion, reduced well productivity, and land subsidence risks. Sustainable groundwater management plans, limitation of drilling new wells, promotion of water-saving irrigation systems, and periodic monitoring are urgently required to reverse or at least mitigate this alarming downward trend in groundwater storage.

Conclusion

According to the results of the study, human activities have increased the intensity of the impact of the decrease in rainfall in recent years on the decline in groundwater in the Ardabil Plain. In other words, the continuous decline in groundwater levels has been related to the amount of withdrawal, i.e., the factor of human activities, compared to the climatic factor. Also, the correlation of groundwater with simultaneous rainfall is lower than the correlation with rainfall a month ago, but both of these correlations are insignificant and do not show the real relationship between groundwater resources and climatic factors well. So that despite the relative increase in rainfall in the study area during the period in question, the groundwater level in this period still had a decreasing trend, which is due to the groundwater level being affected by the withdrawal of groundwater by the operators exceeding the permitted limit, as mentioned before. Therefore, although the rainfall has increased during the period in question, the intensity of withdrawal from the aquifer has been so high that it has neutralized the effect of the increase in groundwater level due to the increase in rainfall.

Keywords: Utility, Climate Change, Meteorological Drought, Ardabil Plain, Groundwater Resources



تأثیرات مقایسه‌ای تغییرات اقلیم و برداشت‌های انسانی بر کاهش سطح زیرزمینی آب در دشت اردبیل

مجید رئوف^۱، حسین غفاری^{۲*} مجتبی سوختانلو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

- ۱-استاد گروه مهندسی آب و پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی،
۲-دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل
۳-دانشیار/گروه مهندسی آب و مدیریت کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
*نویسنده مسئول: majidraoof2000@gmail.com

چکیده

علاوه بر پدیده تغییر اقلیم، فعالیت‌های بشری به‌خصوص برداشت‌های آب تأثیر بسیاری روی آب زیرزمینی دارد که باعث افت زیادی در میزان این آب‌ها بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌گردد. در این تحقیق، اثرات تغییر اقلیم و میزان برداشت بر وضعیت منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل بررسی شده است. به منظور بررسی شدت خشک‌سالی هواشناسی و ارتباط بین خشک‌سالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیک، از داده‌های بارش و آب‌های زیرزمینی دشت اردبیل استفاده شده است. شدت و تداوم خشک‌سالی‌ها با بکارگیری روش‌های متداول محاسبه و بررسی شده و براساس نتایج بدست آمده ارتباط آب‌های زیرزمینی و خشک‌سالی‌های اقلیمی ارزیابی گردید. نتایج حاصله نشان داد که تغییرات سطح آب زیرزمینی با بارش سالانه منطقه همبستگی ناچیز ($R^2=0.005$) و با بارش ماهانه همزمان همبستگی کمتر ($R^2=0.16$) نشان می‌دهد. کاهش سطح آب زیرزمینی با زمان، همبستگی معکوس ($R^2=0.90$) و با تعداد حلقه چاه‌های موجود در دشت اردبیل نیز همبستگی مستقیم ($R^2=0.93$) دارد. همچنین در این تحقیق مشاهده شده است که در آنالیز داده‌های بارش در دشت در دوره آماری ۴۵ ساله (۱۳۸۵-۱۳۴۰)، خشک‌سالی طولانی مدتی از سال ۱۳۶۲ شروع شده، اما در داخل همین دوره ۲۳ ساله میزان بارندگی روند افزایشی دارد. سطح آب زیرزمینی در حال افت می‌باشد که به دلیل تأثیر افزایش روزافزون میزان برداشت از این آب‌ها می‌باشد. فعالیت‌های انسانی باعث گردیده شدت تأثیر کاهش بارندگی در طول سال‌های اخیر بر روی افت آب‌های زیرزمینی بیشتر شود. به‌طور متوسط طی دوره خشک‌سالی (۱۳۶۲-۱۳۸۵) در هر سال ۴۳ سانتی‌متر سطح آب زیرزمینی افت داشته است. کلمات کلیدی: بهره‌برداری، تغییر اقلیم، خشک‌سالی هواشناسی، دشت اردبیل، منابع آب زیرزمینی

۱- مقدمه

منابع آب زیرزمینی دومین منبع آب شیرین موجود در جهان هستند. توسعه کشاورزی و صنعت سبب افزایش برداشت از این منابع شده و افت سطح آب زیرزمینی را به همراه داشته است و در میان عناصر اقلیمی، بارش بیشترین نوسان را دارد (Mohammadi et al., 2023). این مسئله به ویژه در ایران که بارش متوسط سالانه آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر است، اهمیت بیشتری دارد. به همین خاطر مشاهده خشک‌سالی با شدت‌های مختلف و ترسالی‌های مخرب در ایران امری طبیعی و تقریباً متداول می‌باشد. این بی‌نظمی‌ها و نوسانات زیاد در بارش سالیانه باعث خسارات زیادی است که هر ساله رخ می‌دهد، یعنی در سال‌های مرطوب و پرباران سیلاب‌های مخرب سبب تخریب سکونت‌گاه‌ها، زمین‌های کشاورزی، پل‌ها، جاده‌ها، تاسیسات و از همه مهمتر تلفات انسانی می‌باشد.

از طرف دیگر، خشک‌سالی‌ها نیز سبب کاهش تولید محصولات کشاورزی، تلف شدن دام‌ها، تخریب مراتع، فرسایش خاک و افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود (عزیزی، ۱۳۷۸). به عنوان مثال در خشک‌سالی سال ۷۸-۱۳۷۷ متوسط بارش سالیانه ایران ۲۶ درصد کمتر از بارش متوسط دوره سی ساله و در مقایسه با بارش سال قبل (۷۷-۱۳۷۶) حدود ۴۱ درصد کمتر بود، در نتیجه در این خشک‌سالی ۷۰ درصد محصولات دیم و ۱۰ درصد محصولات آبی صدمه دیده و تولید گندم حدود ۲/۴ میلیون تن و تولید برنج حدود چهارصد هزار تن کاهش یافت (Boroumand & Karimi, 2024; Rabiee et al., 2024).

اگر در یک دوره معین سطح آب زیرزمینی به زیر سطح بحرانی پایین رود که منجر به نتایج مخرب شود خشک‌سالی آب زیرزمینی گویند (Histal et al., 2003). در زمینه اثر خشک‌سالی بر آب زیرزمینی در ایران مطالعات متنوعی صورت گرفته است. خوش اخلاق و همکاران (Khoshakhlaq et al., 2012) به نگهداری، حفاظت آب و مدیریت بهینه منابع آب در حوضه اشاره نموده‌اند.

مطالعات خشک‌سالی را می‌توان به چهار قسمت خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، آب شناسی و اقتصادی-اجتماعی طبقه‌بندی کرد. خشک‌سالی هواشناسی به صورت کمبود مقدار بارنگی نسبت به شرایط میانگین بررسی می‌شود که می‌تواند افت سریع رطوبت خاک را به همراه داشته باشد. پایش و پیش بینی خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف یکی از جنبه‌های فنی و مهم در بررسی آن است. برای پایش خشک‌سالی شاخص‌های متعددی در مقیاس‌های متفاوت زمانی ماهانه و سالانه از قبیل: شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (Palmer, 1965)، شاخص خشک‌سالی مؤثر و شاخص منابع آب قابل دسترس در مقیاس روزانه (نصرتی و کاظمی، ۱۳۸۹)، شاخص دهک‌های بارندگی (Gibbs & Maher, 1967) بکار برده شده است.

اکثر مطالعات بر روی شاخص‌های خشک‌سالی روی داده‌های بارندگی بصورت ماهانه انجام شده است از جمله مطالعات گیبس و ماهر در استرالیا (Gibbs & Maher, 1967) که با استفاده از شاخص دهک‌ها و مرتب کردن داده‌های بارندگی ماهانه گام مهمی در این زمینه برداشته‌اند. لمب نیز (Lamb, 1982) با استفاده از شاخص انحراف از استاندارد در جنوب صحرا به این نتیجه رسید که دهه ۱۹۴۰ با خشک‌سالی شدید همراه بوده و تا دهه ۱۹۷۰ ادامه داشته است.

واندر کامپ و مانتوس (Van der kamp & Maathuis, 1991) نوسان سطح آب زیرزمینی سالانه را به عنوان نتیجه‌ای از عمل رطوبت سطحی با در نظر گرفتن دو جنبه تئوری مشخصات آبخوان و داده‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که به علت فاصله زیاد چاه‌های مشاهده‌ای با ایستگاه‌های هواشناسی همبستگی نسبتاً ضعیفی بین عوامل اقلیمی و سطح آب زیرزمینی وجود دارد و گفتند که برای ارتباط دادن متغیرهای اقلیمی با سطح آب زیرزمینی بایستی ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق تغذیه وجود داشته باشد.

ارزیابی منشاعیابی منابع تغذیه کننده آب سفره زیرزمینی و تعیین دوره‌های تر و خشک‌سالی با ردیاب‌های پرتوزا توسط سعادتی و همکاران (۱۳۸۷) صورت گرفت که در آن با اندازه‌گیری و تحلیل داده‌ها و اندازه‌گیری ردیاب‌های پرتوزا، منشأ منابع آب تغذیه کننده سفره‌های زیرزمینی در مناطق مختلف، تعیین و سهم تغذیه متمرکز و انتشاری، تفسیر نیمرخ پرتوزاهای پایدار آب در محیط غیراشباع به منظور تعیین دوره‌های تر و خشک‌سالی در دشت هشتگرد بررسی شد. نتایج بررسی نشان داد که به منظور بهره‌گیری مناسب از ردیاب‌های پرتوزای پایدار آب در منابع مختلف در آغاز بایستی ارتباط دو پرتوزا اکسیژن ۱۸ و دوتریوم تحلیل شود.

اسلامیان و همکاران (Eslamian et al., 2009) به بررسی تغییرات روند بارندگی، تعیین دبی سیلاب به روشهای مانینگ، فولر، روش SCS و ترسیم هیدروگراف سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف، وضعیت سیلاب در حوضه پرداخته‌اند و با بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، تأثیرگذاری تغییرات بارندگی بر تغییرات منابع آب زیرزمینی منطقه با ایجاد ضریب همبستگی در تأخیرهای زمانی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ ماهه برای سال‌های اخیر (۱۳۸۲-۱۳۷۹) طی ۳۶ ماه تعیین کرده‌اند. نتایج نشان داد که بین وقوع ریزش‌های جوی و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه ارتباط معنی‌داری وجود دارد و این موضوع در مورد اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه بدین صورت است که اثر ریزش‌های جوی بر سطح آب سفره‌های زیرزمینی با تأخیر ۳ ماهه صورت می‌گیرد. ضمن این که روند کلی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه حالت نزولی دارد.

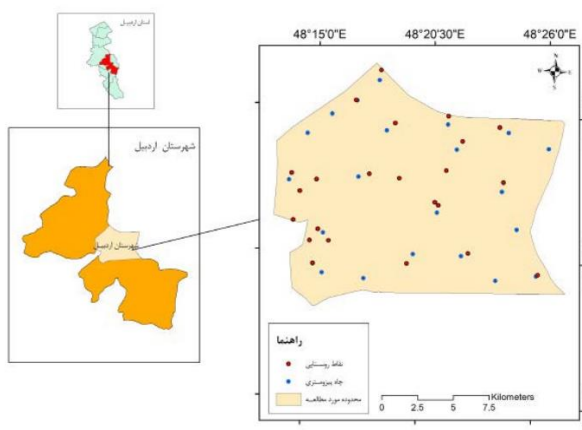
کرد و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از ModFlow به بهینه‌سازی برداشت آب آبخوان دشت اردبیل به منظور جلوگیری از افت بیشتر

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب دشت چاردولی در شرق استان کردستان پرداخت. نتایج رحیمی (۱۴۰۴) نشان داد که در شرایط اقلیمی شرایط بدبینانه کاهش بارندگی و افزایش دمای حداکثر و حداقل بیشتر بوده و افت سطح آب زیرزمینی در این سناریو نیز به طبع بیشتر مشاهده گردید. همچنین مشاهده گردید سطح آب زیرزمینی در پیرومترهای واقع در مرکز آبخوان و بخش جنوبی افت بیشتری را داشته است. همچنین، خسارانی و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی روند بارش و ارزیابی خشکسالی در غرب ایران با استفاده از شاخص‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره ۲۰۱۸-۲۰۰۸، شهرهای سنندج، خرم‌آباد و ایلام، و در دوره ۲۰۱۸-۲۰۰۹، همدان و ارومیه، بارش کمتر از میانگین بلندمدت را تجربه کرده‌اند. شاخص SPI^1 در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک دقیق‌ترین شاخص برای پایش خشکسالی تشخیص داده شد و شاخص CZI^2 با همبستگی ۹۳ درصد در رتبه دوم اهمیت قرار گرفت. اهداف تحقیق حاضر به شرح زیر می‌باشند: ۱- تعیین روند تغییرات بارش و سطح آب زیرزمینی دشت اردبیل طی دوره ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۵؛ ۲- محاسبه ضرایب همبستگی بین سطح آب زیرزمینی با بارش (در تأخیرهای زمانی مختلف) و تعداد چاه‌ها؛ ۳- تعیین سهم نسبی هر یک از عوامل اقلیمی و انسانی در افت سطح آب با استفاده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

موقعیت مطالعاتی دشت اردبیل با وسعتی بالغ بر ۱۲۱۷/۱۸ کیلومترمربع در محدوده‌ای بین $48^{\circ}8'45''$ تا $48^{\circ}37'30''$ طول شرقی و $38^{\circ}2'15''$ تا $38^{\circ}31'00''$ عرض شمالی در استان اردبیل واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت اردبیل به همراه چاه‌های

پیرومتری

Fig 1. Geographic location of the Ardabil Plain aquifer along with the piezometric wells

سطح ایستابی و در صورت امکان، جبران کاهش ذخیره آن پرداختند. بعد از مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، بر اساس مقدار افت، آبخوان دشت اردبیل به پانزده بخش، زون‌بندی و پس از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار PEST، مقادیر برداشت مجاز محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده برای تعادل بخشی سطح ایستابی آبخوان، بیشترین بهره‌برداری مربوط به شرق آبخوان و کمترین بهره‌برداری مربوط به مرکز دشت می‌باشد.

پاندا و همکاران (Panda et al., 2007) در ایالت اوریسای هند مطالعاتی در زمینه ارتباط منابع آب زیرزمینی با خشک‌سالی صورت دادند که هدف از این مطالعات شناسایی و تعیین سطح آب زیرزمینی برای درک مکانیسم خشک‌سالی احتمالی در رابطه با فشارهای انسانی با استفاده از روش آماری Mann-Kendall غیر پارامتریک بوده است. در این مطالعه که اطلاعات سطح آب زیرزمینی مربوط به قبل و بعد از فصل بارش از ۱۰۰۲ ایستگاه کنترل کننده در طول دوره آماری (۲۰۰۳-۱۹۹۴) بدست آمده بود مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج نشان داد که پایین رفتن سطح آب زیرزمینی به علت کمبود بارندگی در طول سال‌های خشک، دمای زیاد و فشار انسانی، از طریق تغذیه در سال‌های مرطوب جبران نمی‌گردد. این مطالعه، خشک‌سالی، دمای بالا یا فشار انسانی را که تأثیر بسیار زیادی روی افت سطح آب زیرزمینی دارند تعیین نکرد. کابلی و همکاران (Kaboli et al., 2024) در مطالعه‌ای جامع بر روی دشت گوهرکوه در جنوب شرقی ایران نشان دادند که کاهش سطح آب زیرزمینی در مناطق خشک با تبخیر بالا عمدتاً ناشی از برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی و طولانی شدن دوره‌های خشک‌سالی است. در همین ارتباط، صفدری و همکاران (Safdari et al., 2022) با مدل‌سازی کاهش منابع زیرزمینی در ایران نتیجه گرفتند که شدت چرخه‌های خشک‌سالی، رشد بخش کشاورزی و توسعه صنعتی، عوامل اصلی تغییرات سطح آبخوان‌ها هستند. در همین زمینه، نتایج پژوهش زارعی و همکاران (Zarei et al., 2025) در حوضه آبریز اترک، با استفاده از روش‌های تحلیل آشوب و چندفرکتالی نیز بیانگر آن است که دینامیک غیرخطی و نامنظم خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک تا حد زیادی بر الگوی جریان سطحی و شارژ مجدد سفره‌های زیرزمینی تأثیرگذار است. در همین راستا، رهنما و همکاران (Rahnama et al., 2024) نشان داد که به‌کارگیری مدل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های پیشرفته می‌تواند در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آبخوان‌ها و تدوین برنامه‌های مدیریتی مؤثر نقش بسزایی ایفا کند. از مطالعاتی که در زمینه ارتباط آب‌های زیرزمینی با خشک‌سالی انجام گرفته می‌توان به تحقیقات استرکامپ و همکاران (Osterkamp, 1995) به منظور برآورد میزان شارژ مجدد آب‌های زیرزمینی در حوضه‌های بدون باران سنج در کشور عمان و ابوظبی که به روش موازنه آب انجام شده، اشاره نمود. رحیمی (۱۴۰۴)، به

- داده‌های هیدروگراف: سطح تراز آب زیرزمینی^۱ به صورت سالیانه برای دوره ۳۵ ساله (۱۳۵۰ تا ۱۳۸۵) و به صورت ماهیانه برای دوره ۲۰ ساله (۱۳۶۵ تا ۱۳۸۵) از ایستگاه‌های مطالعاتی سازمان منابع آب منطقه استخراج شد.

- داده‌های بهره‌برداری: تعداد چاه‌های مجاز و غیرمجاز بهره‌برداری شده در دشت، که نشان‌دهنده بار^۲ اعمال شده بر آبخوان است، طی بازه زمانی ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۰ مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور بررسی رابطه خشک‌سالی هواشناسی و تعداد چاه‌ها با منابع آب زیرزمینی، داده‌های بارش سالیانه و ماهیانه ۴۵ ساله (۱۳۸۵-۱۳۴۰) دشت اردبیل، داده‌های هیدروگراف سالیانه طی دوره ۳۵ ساله (۱۳۸۵-۱۳۵۰) و ماهیانه ۲۰ ساله از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۸۵ استفاده شده است. همین‌طور تعداد چاه‌های مورد استفاده در دشت از سال ۱۳۴۰ تا سال ۱۳۸۰ به‌کار رفته است. در این تحقیق برای تعیین خشک‌سالی یا ترسالی در سال‌های مورد بررسی از شاخص SPI استفاده شده است. همچنین پارامتر «درصد انحراف از میانگین بارش» (معادله ۱)، علاوه بر شاخص SPI و برای تعیین انحراف بارش هر سال از مقدار میانگین کل دوره، مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\% \Delta P = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} * 100 \quad (1)$$

که در این رابطه $\% \Delta P$ درصد انحراف از میانگین بارش و P_i بارش هر سال یا هر ماه مورد نظر و $\bar{P}$ میانگین دوره می‌باشد. در آمار مربوط به بارندگی‌ها و آب‌های زیرزمینی در این دشت در برخی سال‌ها نواقص آماری وجود داشت که در این تحقیق برای بازسازی این نواقص از بازسازی به روش میانگین وزنی استفاده شده است.

آمار مربوط به بارندگی دشت در سال ۱۳۴۳ (ماه)، ۱۳۴۴ (۱ ماه)، ۱۳۵۵ (۳ ماه)، ۱۳۵۶ (۱ ماه) و در سال ۱۳۵۹ (۲ ماه) نیاز به بازسازی داشت. همچنین آمار مربوط به هیدروگراف آب زیرزمینی دشت در سال‌های ۱۳۷۶، ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ وجود نداشت که داده‌های سالانه و ماهانه این سال‌ها نیز از طریق بازسازی به روش میانگین وزنی به دست آمد. نتایج حاصل نیز عمده‌تاً به صورت گرافیکی ارائه گردیده است. همین‌طور برای مطالعه ارتباط خشک‌سالی با نوسان سطح آب زیرزمینی و انجام محاسبات و تحلیل‌ها از روش‌های همبستگی، رگرسیون خطی و توان گرافیکی و محاسباتی نرم‌افزارهای آماری استفاده شده است. در طول دوره مورد مطالعه، نواقص آماری در برخی از داده‌های بارش و تراز آب زیرزمینی مشاهده شد که در صورت عدم رفع، دقت مدل‌سازی را کاهش می‌داد. برای رفع این نواقص، به روش‌های زیر عمل گردید:

- نواقص بارش: داده‌های بارش ماهیانه در سال‌های ۱۳۴۳ (یک ماه)، ۱۳۴۴ (یک ماه)، ۱۳۵۵ (سه ماه)، ۱۳۵۶ (یک ماه) و ۱۳۵۹ (دو ماه) با استفاده از داده‌های ماه‌های پیشین و پسین همان ایستگاه و داده‌های همان ماه در ایستگاه‌های مجاور با روش وزن‌دهی عکس فاصله بازسازی شدند.

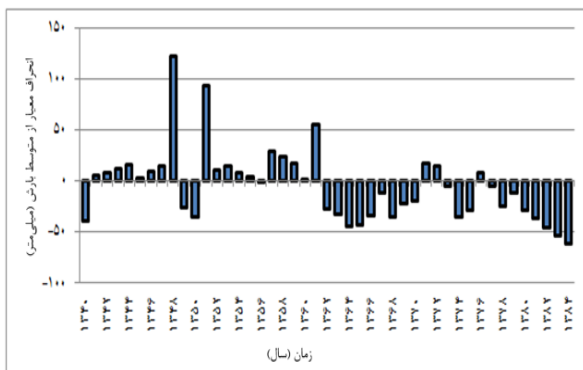
منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه رودخانه ارس محسوب می‌گردد (رئوف و میرزایی، ۱۳۹۸). دشت اردبیل با کد مطالعاتی ۱۱/۳ از طریق جبهه‌های تغذیه ورودی آب زیرزمینی رواناب زیرحوضه‌های مشرف به دشت و رودخانه‌های مهم نظیر بالخلوچای، قوری چای، هیرچای، نمین چای و رودخانه‌های دیگر نظیر نرگس چای، سولاچای، نوران چای (سرشاخه‌های قره سو) تغذیه می‌شود (رئوف و عزیزی ۱۳۹۶). مقدار متوسط درجه حرارت روزانه در یک دوره دراز مدت (۱۰ ساله) در دشت اردبیل برابر ۹/۸ درجه سانتیگراد، مقدار حداکثر آن برابر ۳۰/۸ درجه سانتیگراد (مربوط به ماه مرداد) و حداقل آن برابر ۳۳/۸- درج سانتیگراد (مربوط به ماه بهمن) است. مقدار متوسط تبخیر و تعرق این دشت برابر ۹۴۰/۱ میلی متر می‌باشد. نحوه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی چاه‌های منتخب دشت اردبیل، قنات‌ها، چشمه‌ها و چاه‌های آب شرب اردبیل می‌باشند که نمونه برداری تعدادی از آن‌ها به صورت ماهانه و در بقیه به صورت ۲ نوبت در سال صورت می‌گیرد. ضمن آنکه تناوب نمونه برداری از تعدادی چشمه‌های شبکه پایش از ۲ به ۴ نوبت افزایش می‌یابد (Ghafari et al., 2023). براساس نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیک و حفاری‌ها، عناصر تشکیل دهنده آبخوان به نسبت‌های متفاوت از عناصر تخریبی نظیر رس، ماسه، شن و قلوه سنگ تشکیل یافته است عموماً در حواشی دشت درصد عناصر درشت دانه‌تر بیشتر بوده و به سمت میانی و خروجی دشت با فاصله یافتن از محورهای رسوب‌گذاری به تدریج قطر ذرات کاهش می‌یابد (گزارش نهایی طرح مطالعات جامع دشت اردبیل). این دشت از نظر زمین‌شناسی عمدتاً بر روی آبرفت‌های عمیق پلیستوسن و هولوسن قرار گرفته است که تشکیل‌دهنده اصلی آبخوان اصلی (Unconfined Aquifer) منطقه هستند. وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه تحت تأثیر عوامل توپوگرافی و اقلیم سرد و نیمه‌خشک آن قرار دارد. حجم برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی طی دهه‌های اخیر، به‌ویژه برای مصارف کشاورزی، منجر به افت پیوسته سطح تراز ایستابی و افزایش پدیده فرونشست در بخش‌هایی از دشت شده است.

۲-۲- روش کار

تحلیل رابطه بین خشک‌سالی و منابع آب زیرزمینی مستلزم به‌کارگیری مجموعه‌ای از داده‌های زمانی دقیق است. در این تحقیق، از داده‌های بارش، هیدروگراف و بهره‌برداری طی بازه‌های زمانی مشخص استفاده گردید:

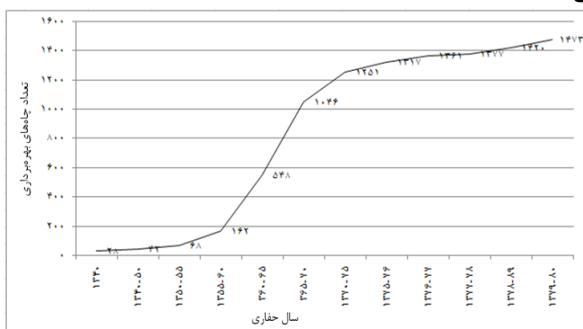
- داده‌های بارش: داده‌های بارش سالیانه و ماهیانه جمع‌آوری شده از ۴۵ سال آماری، از سال ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۵ شمسی، به عنوان ورودی اصلی تحلیل خشک‌سالی مورد استفاده قرار گرفت.

می‌شود که مقادیر بارش دارای یک روند کاهشی بوده اما نوسانات بارش یک روند افزایش داشته، شدت و فراوانی خشک‌سالی‌های هواشناسی بطور قابل توجهی افزایش یافته‌اند. در این دوره ۴۵ ساله ۲۳ سال با شرایط خشک‌سالی و ۲۲ سال با شرایط ترسالی نشان دهنده تعادل بین سال‌های خشک و سال‌های مرطوب می‌باشد. اما مسئله‌ی قابل توجه در این بحث شروع خشک‌سالی طولانی از سال ۱۳۶۲ به بعد می‌باشد که در طی این دوره تنها ۳ سال (۱۳۷۱، ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶) دارای شرایط ترسالی می‌باشند.



شکل ۴- شدت خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های اقلیمی به درصد
Fig 4. Intensity of climatic droughts and wet spells in percentage

افزایش چاه‌ها به خصوص در بازه زمانی (۱۳۶۰-۱۳۷۵) که اکثر آن‌ها نیز در طول جنگ تحمیلی بعثت نبود نظارت کافی بر حفر چاه توسط بهره برداران بود (شکل ۵)، قنوت (تعداد قنوت دایر، ۳۴ رشته از ۵۵ رشته قنات به ثبت رسیده براساس آماربرداری در سطح منطقه است که دارای ۱/۶۵۷ میلیون مترمکعب میزان تخلیه در سال می‌باشد) و چشمه‌ها (تعداد ۱۱۵۸ دهانه چشمه با میزان تخلیه سالانه برابر با ۲۹ میلیون مترمکعب) و گسترش کشت آبی در سطح دشت، باعث شده است که برداشت آب زیرزمینی در طول دوره ذکر شده به شدت افزایش یابد. این افزایش برداشت تعادل بین ورودی و خروجی دشت را برهم زده و بیلان آب را منفی و ذخیره آب زیرزمینی را کاهش می‌دهد.



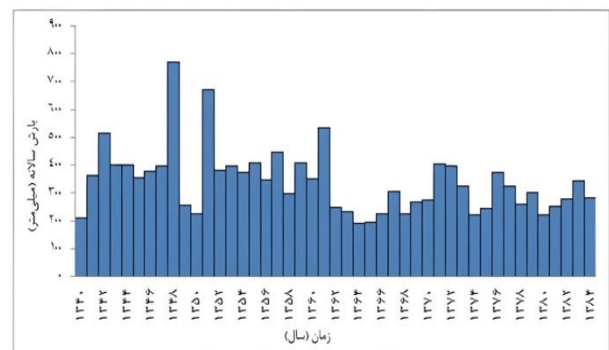
شکل ۵ - تغییرات فراوانی چاه‌ها در دشت اردبیل
Fig 5. Changes in the frequency of wells in the Ardabil plain

همانطور که در شکل قبل مشخص است کاهش ذخیره آب دشت یک روند منفی کاملاً مشخصی را نمایان می‌کند؛ بطوری که همبستگی سطح آب زیرزمینی دشت با زمان حدود ۰/۹- (منفی نه دهم) می‌باشد.

- نواقص هیدروگراف: داده‌های سالانه و ماهانه تراز آب زیرزمینی برای سال‌های ۱۳۷۶، ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ به دلیل عدم ثبت یا دسترسی، از طریق درون‌یابی وزنی فاصله بر اساس روند کلی داده‌های چاه‌های اطراف استخراج و تکمیل گردید.

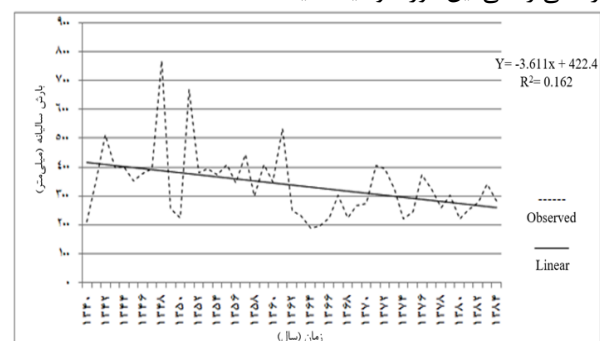
۲- نتایج و بحث

بررسی داده‌های بارندگی‌های منطقه نشان داده است که بارش متوسط سالیانه دشت اردبیل حدود ۳۴۷/۴ میلی متر بوده و در سال‌های پر باران مقدار بارش به حدود ۷۶۹/۵ و در سال‌های کم باران به حدود ۱۸۹/۱ میلی متر می‌رسد، که نسبت سال خشک به سال مرطوب تقریباً یک به چهار می‌باشد. این نسبت نشان می‌دهد که نوسان بارش سالانه قابل توجه است (شکل ۲).



شکل ۲- نوسان سالانه بارش در دشت اردبیل
Fig 2. Annual precipitation fluctuations in the Ardabil Plain

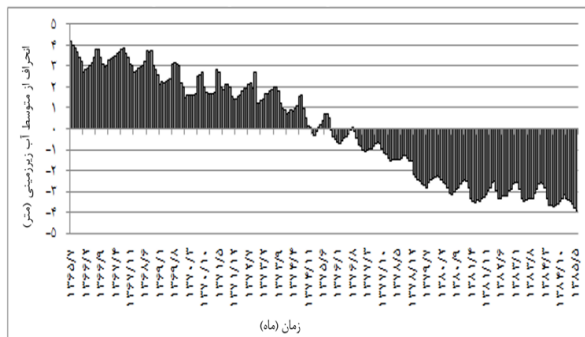
در بررسی‌هایی که روی روند بارش سالانه انجام گرفت مشخص گردید که در بارش‌های سالیانه این دشت روند منفی به چشم می‌خورد. بدین صورت که طی دوره ۴۵ ساله، هر سال بطور متوسط ۳/۵۳ میلی متر کاهش داشته است (شکل ۳). این روند با همبستگی نه چندان قوی ($R^2 = 0.162$)، تا حدودی می‌تواند تقریباً ۱۵۹ میلی متر کاهش بارندگی را طی این دوره توجیه نماید.



شکل ۳- رگرسیون خطی بین بارش و زمان (روند منفی بارش قابل مشاهده است).
Fig 3. Linear regression between precipitation and time (negative precipitation trend is visible.)

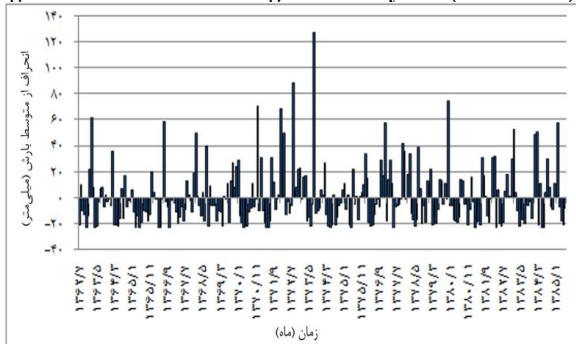
در شکل ۴، درصد انحراف از میانگین بارش با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و نمایش داده شده است که ستون‌های بالای صفر، سال‌های تر و پایین صفر سال‌های خشک را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص

این معادله با این فرض استخراج شده است که در صورت عدم وجود چاه بهره‌برداری، سطح پی‌زومتري دشت اردبیل صفر در نظر گرفته شود و به ازای افزایش تعداد چاه‌ها سطح آب زیرزمینی افت نماید. عرض از مبدا ۰/۸۹۸ نیز از رگرسیون نقاط به دست آمده است و یک داده اندازه‌گیری شده نمی‌باشد.



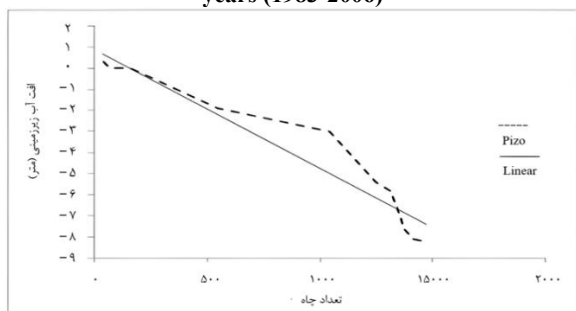
شکل ۷- انحراف از متوسط سری ماهانه سطح آب زیرزمینی طی سال‌های آبی (۱۳۸۵-۱۳۶۵)

Figure 7. Deviation from the average monthly series of groundwater levels during the water years (1986-2006)



شکل ۸- انحراف از متوسط سری ماهانه بارش دشت اردبیل طی سال‌های آبی (۱۳۸۵-۱۳۶۲)

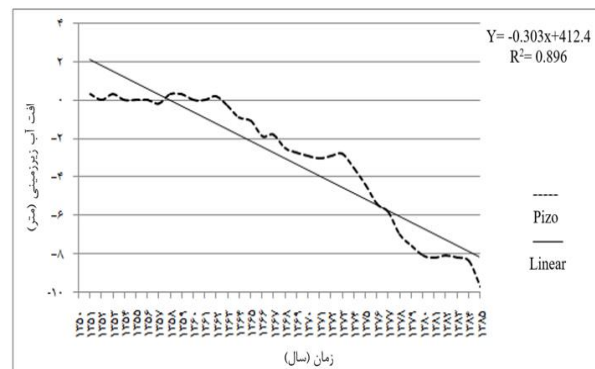
Figure 8- Deviation from the average monthly precipitation series of the Ardabil Plain during the wet years (1983-2006)



شکل ۹- رگرسیون خطی بین افزایش تعداد چاه‌ها و کاهش سطح آب زیرزمینی دشت اردبیل

Fig 9. Linear regression between the increase in the number of wells and the decrease in groundwater level in the Ardabil Plain

بر اساس این ارتباط، سالانه حدود ۲۹ سانتی‌متر افت سطح آب اتفاق می‌افتد (شکل ۶). این در حالی است که این کاهش سطح آب زیرزمینی (سالانه ۰/۲۹ متر) در طی ۳۵ سال دوره آماری بوده است ولی در این دشت دوره خشک‌سالی که به مدت ۲۳ سال از سال‌های (۱۳۶۲-۱۳۸۵) وجود داشت؛ تمامی این افت را شامل می‌شده است که تقریباً ۱۰ متر و سالانه بطور متوسط ۰/۴۳ متر می‌باشد.



شکل ۶- رگرسیون خطی بین سطح آب زیرزمینی و زمان
Fig 6. Linear regression between groundwater level and time

با توجه به میزان سطح آب‌های زیرزمینی از متوسط ماهانه سطح آب در یک دوره ۲۳ ساله (۱۳۶۲-۱۳۸۵) (شکل ۷)، می‌توان به تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر (شکل ۸)، در افت سطح آب زیرزمینی دشت دست یافت. با مقایسه و بررسی شکل (۵) با شکل (۶) به خوبی آشکار می‌گردد که با افزایش مداوم تعداد چاه‌ها و حجم برداشت سطح آب زیرزمینی دشت و همین‌طور کاهش میزان بارندگی منطقه از سال ۱۳۶۲ به بعد افت شدیدی در سطح آب زیرزمینی دشت از همین دوره شروع شده است. برای توجیه بیشتر این موضوع شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به میزان سطح آب‌های زیرزمینی از متوسط ماهانه سطح آب در یک دوره ۲۳ ساله (۱۳۶۲-۱۳۸۵) (شکل ۷)، می‌توان به تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر (شکل ۸)، در افت سطح آب زیرزمینی دشت دست یافت. با مقایسه و بررسی شکل (۵) با شکل (۶) به خوبی آشکار می‌گردد که با افزایش مداوم تعداد چاه‌ها و حجم برداشت سطح آب زیرزمینی دشت و همین‌طور کاهش میزان بارندگی منطقه از سال ۱۳۶۲ به بعد افت شدیدی در سطح آب زیرزمینی دشت از همین دوره شروع شده است. برای توجیه بیشتر این موضوع شکل ۹ ارائه شده است.

شکل (۹)، ارتباط خطی افت سطح آب زیرزمینی و افزایش تعداد کل چاه‌ها را نمایش می‌دهد. این ارتباط یک همبستگی معکوس با ضریب حدود ۰/۹۳ را ارائه می‌کند که بسیار قابل توجه است. رابطه (۲) ارتباط مذکور را نشان می‌دهد:

$$Pizo = -0.005NW + 0.898 \quad (2)$$

که $Pizo$ سطح آب زیرزمینی به متر و NW تعداد کل چاه‌ها می‌باشد.

ارتباط مستقیم بین بارش و سطح آب زیرزمینی از طریق این ضرایب برداشت می‌شود. اما برای بررسی اینکه تأثیر بارش بر روی سطح آب زیرزمینی همزمان است یا با تأخیر صورت می‌گیرد در جدول ۱ علاوه بر ارتباط همزمان، ارتباط سطح آب زیرزمینی با بارش‌های یک تا چهار ماه قبل نیز آورده شده است. رابطه آب زیرزمینی با بارش‌های ۲ تا ۴ ماه قبل معکوس است (روابط ۵ تا ۷). مسئله‌ای که قابل تأمل می‌باشد مربوط به رابطه آب زیرزمینی با بارش‌های همزمان (شکل ۱۰) و یک ماه قبل (شکل ۱۱) است که بیشترین ضریب همبستگی با سطح اطمینان کمتر مربوط به ارتباط سطح آب زیرزمینی با بارش ۱ ماه قبل و کمترین ضریب همبستگی با سطح اطمینان بیشتر مربوط به رابطه سطح آب زیرزمینی با بارش همزمان می‌باشد (روابط ۳ و ۴). هدف از اعمال تبدیل خطی بر داده‌های سطح آب زیرزمینی و بارش در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲، صرفاً هم‌مقیاس‌سازی بصری برای تسهیل مقایسه روندهای زمانی بوده و این تبدیل‌ها در هیچ‌یک از تحلیل‌های آماری و استنباطی مقاله به‌کار نرفته‌اند. در جدول ۱ همچنین ارتباط سالانه بارش و سطح آب زیرزمینی نیز آورده شده است که آن هم ضریب همبستگی ضعیفی را نشان می‌دهد و رابطه برقرار شده بین آن‌ها نشانگر این است که درحالی‌که در طول خشک‌سالی طولانی در منطقه بارش روند افزایشی داشته سطح آب‌های زیرزمینی همچنان رو به کاهش است (شکل ۱۲).

$$Pizo = -0.000p + 1312.797 \quad (3)$$

$$Pizo = -0.000P1L + 1312.804 \quad (4)$$

$$Pizo = -0.02P2L + 1312.814 \quad (5)$$

$$Pizo = -0.005P3L + 1312.881 \quad (6)$$

$$Pizo = -0.005P4L + 1312.859 \quad (7)$$

$$Pizo = -0.003P + 1314.102 \quad (8)$$

که در روابط فوق $Pizo$ به متر، p بارش ماهانه، $P1L$ بارش یک ماه قبل، $P2L$ بارش دوماه قبل، $P3L$ بارش سه ماه قبل، $P4L$ بارش چهارماه قبل و P بارش سالانه دشت به میلی متر می‌باشد.

برای بررسی ارتباط بارش و نوسان سطح آب زیرزمینی، ضرایب همبستگی با میزان سطح اطمینان هر کدام در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ضرایب همبستگی و میزان سطح اطمینان بین

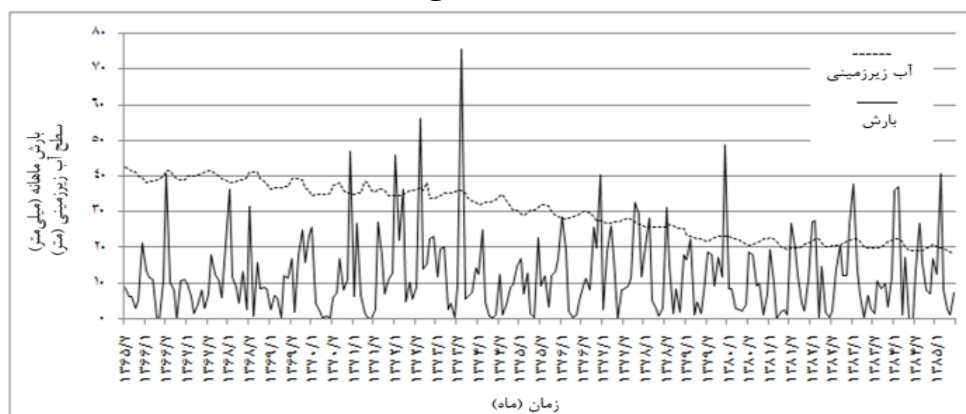
بارش و نوسان سطح آب زیرزمینی

Table 2. Correlation coefficients and confidence levels between precipitation and groundwater level fluctuations

حالت زمانی	ضریب همبستگی	سطح معنی‌داری	تفسیر
همزمان	0.16*	0.05	رابطه ضعیف و معنی‌دار
یک ماه قبل	0.36**	0.01	رابطه متوسط و معنی‌دار
دو ماه قبل	0.36**	0.01	رابطه متوسط و معنی‌دار
سه ماه قبل	0.16*	0.05	رابطه ضعیف و معنی‌دار
چهار ماه قبل	0.16*	0.05	رابطه ضعیف و معنی‌دار
همزمان (سالانه)	0.005	0.62	ناچیز و غیرمعنی‌دار

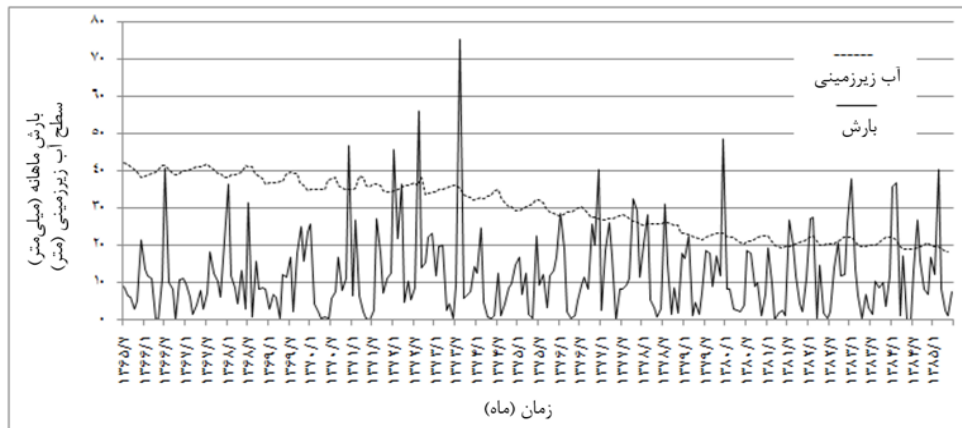
*, **, به ترتیب معنی‌داری در سطح پنج درصد و یک درصد

نتایج جدول همبستگی نشان می‌دهد که بین بارش و نوسانات سطح آب زیرزمینی رابطه‌ای مثبت و در برخی موارد معنی‌دار وجود دارد، به‌طوری‌که بیشترین همبستگی در تأخیر یک تا دو ماهه مشاهده شده است ($r=0.36, p<0.01$) که بیانگر پاسخ تأخیری آبخوان به رخدادهای بارشی و زمان‌بر بودن فرایند نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی است. همچنین همبستگی همزمان و با تأخیرهای سه و چهار ماهه ضعیف‌تر بوده و نشان می‌دهد اثر بارش در کوتاه‌مدت بیشترین نقش را در تغییرات سطح آب دارد. در مقابل، در مقیاس سالانه ضریب همبستگی ناچیز است که می‌تواند ناشی از ناپایداری الگوی توزیع بارش، اثر تبخیر و تعرق، و نیز تأثیر عوامل انسانی مانند برداشت از آب زیرزمینی باشد. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی نسبت به بارش واکنشی تأخیری و محدود دارد و بیشترین اثر بارش در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت قابل مشاهده است.



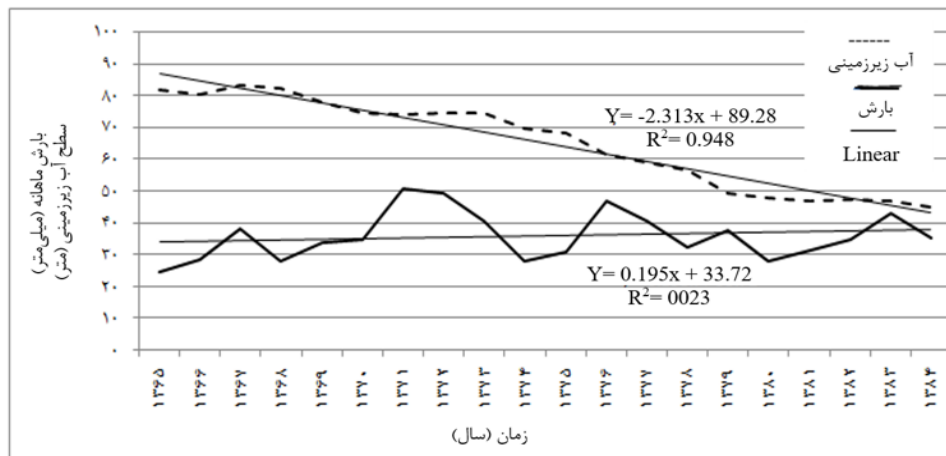
شکل ۱۰- ارتباط سطح آب زیرزمینی با بارش بصورت ماهانه (به منظور ساد شدن مقایسه سطح آب زیرزمینی بصورت $(pizo*3)+35$ و بارش بصورت $(mo.pre)/2$ اصلاح شده است.)

Fig 10. Relationship between groundwater level and monthly precipitation (In order to simplify the comparison, groundwater level has been modified as $(pizo*3)+35$ and precipitation as $(mo.pre)/2$.)



شکل ۱۱- ارتباط سطح آب زیرزمینی با بارش یک ماه قبل بصورت ماهانه (به منظور سادن شدن مقایسه سطح آب زیرزمینی بصورت $(pizo*3)+35$ و بارش بصورت $(mo.pre)/2$ اصلاح شده است).

Fig 11. Relationship between groundwater level and precipitation one month ago on a monthly basis (for ease of comparison, groundwater level has been modified as $(pizo*3)+35$ and precipitation as $(mo.pre)/2$).



شکل ۱۲- ارتباط سطح آب زیرزمینی با بارش بصورت سالانه (به منظور سادن شدن مقایسه سطح آب زیرزمینی بصورت $(pizo*5)+65$ و بارش بصورت $(mo.pre)/8$ اصلاح شده است).

Fig 12. Relationship between groundwater level and annual precipitation (for ease of comparison, groundwater level has been modified as $(pizo*5)+65$ and precipitation as $(mo.pre)/8$).

کاهش مشاهده شده، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط فعلی، راهبردهای مدیریتی صرفاً با تکیه بر متغیر اقلیمی (بارش) به تنهایی برای کنترل وضعیت آب زیرزمینی کافی نیست و لازم است کنترل فشار برداشت در اولویت قرار گیرد. افزون بر این، نتایج نشان‌دهنده همبستگی معکوس سطح آب زیرزمینی با تعداد حلقه چاه‌های دشت است ($r \approx 0.93$)، که موید نقش پررنگ بهره‌برداری در تغییرات سطح آبخوان است. بر این مبنای، پیشنهادهای سیاست‌گذاری و مدیریت عملیاتی برای استان اردبیل به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. کنترل و محدودسازی توسعه برداشت: توقف کامل در صدور مجوز حفر چاه جدید در محدوده‌های دارای افت مشاهده شده و اجرای برنامه خرید، ساماندهی و در صورت لزوم مسدودسازی چاه‌های غیرمجاز به منظور کاهش فشار برداشت.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که منابع آب زیرزمینی در دشت اردبیل تحت تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. با این حال، در دوره خشکسالی مورد بررسی، اثر غالب بر افت سطح آب زیرزمینی، برداشت انسانی از آبخوان بوده است. به طور کلی، مشاهده شد که کاهش و افت مداوم سطح آب زیرزمینی نسبت به سیگنال‌های اقلیمی، بیشتر با افزایش شدت برداشت و فشار بهره‌برداری ارتباط دارد. همچنین سطح آب زیرزمینی با بارش هم‌زمان همبستگی ضعیف و با بارش یک ماه قبل نیز همبستگی کمتری نشان می‌دهد؛ بنابراین، اگرچه در دوره مطالعه افزایش نسبی بارش مشاهده شد، به دلیل شدت برداشت فراتر از ظرفیت بهره‌برداری پایدار، اثر بالقوه بارش در جبران افت سطح آب زیرزمینی خنثی شده است. بر این اساس، با وجود روند

- Mohammadi, H. , Bazrafshan, J. and Liaghat, A. (2023). Correlation analysis of drought-dust and its relationship with vegetation changes in Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(10), 1447-1465. doi: 10.22059/ijswr.2023.364328.669560. (In Persian)
- Nosrati K, and Kazemi Y, 2011. Daily Monitoring of Drought and Water Resources in Different Climates of Iran, *Rangeland and Watershed Management Journal*, Iranian Journal of Natural Resources, 64 (1), 94-79. (In Persian)
- Osterkamp WR, 1995. Techniques of ground water recharge estimates in arid/ semi-arid areas, with examples from abu Dhabi, J. of Arid Environment, 31, 349-369. doi: 10.1016/S0140-1963(05)80038-2
- Palmer WC, 1965. Meteorological drought. U.S. Dept. of Commerce Weather Bureau, Washington, DC, 45, doi.org/10.1038/299046a0
- Panda DK, Mishra A, Jena SK, James BK, and Kumar A, 2007. The influence of drought and anthropogenic effects on ground water in Orissa, India. *Journal of Hydrology*, 343, 140-153. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.007
- Rabiee, Z., Asakereh. H., Khosravi, Y. (2024). Investigating decadal changes in the probability of Iran's precipitation duration (1977-2016). *Geographical Data (SEPEHR)*, 33 (131), 85-103. doi: 10.22131/SEPEHR.2023.1995956.2967 (In Persian)
- Rahimi, A. (2025). Investigating the Effects of Climate Change on Water Resources in the Chahardoli Plain. *Hydraulics and Water Science*, 35(3), 51-65. doi: 10.22034/hws.2026.70456.1039 (In Persian)
- Rahnama M, Singh P, and Zhao Y. 2024. A critical review of climate change impacts on groundwater resources: Current status, future possibilities, and role of simulation models. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100755, doi.org/10.1016/j.gsd.2024.100755.
- Raoof M, and Azizi Mobaser J, 2018. Evaluation of Eighteen Reference Evapotranspiration Models under the Ardabil Climate Condition. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), 227-241. doi: 10.22069/jwsc.2017.13174.2784
- Raoof M, and Mirzaei S, 2019. Determination of the Most Appropriate Geostatistical Method of Spatial Interpolation for Maximum Daily Rainfalls in Atashgah Basin in the Ardabil Province. *Water and Soil Science*, 29(3), 13-25.
- Saadati H, Sharifi F, Mahdavi M, Ahmadi H, and Mohseni Saravi M, 2009. Evaluation of the source of groundwater recharge sources and determination of wet and drought periods with radionuclides, *Rangeland and Watershed Management Journal*. Iranian Journal of Natural Resources, 62 (1), 63-49. (In Persian)
- Safdari M, Mousavi SJ, and Maghsoudi M, 2022. Groundwater depletion in Iran: modeling and controlling strategies based on drought cycles and industrial utilization. *Journal of Hydrology and Regional Studies*, 41, 101077, doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101077.
- Van der kamp G, and Maathuis H, 1991. Annual fluctuations groundwater levels as a result of loading by surface mouiture. *Journal of Hydrology*, 127,137-152. doi: 10.1016/0022-1694(91)90112-U
- Zarei H, Ahmadi S, and Falah N, 2025. Hydrological drought quantification and nonlinear dynamics of river discharge using multifractal and chaos theory: Case study of Atrak
۲. ساماندهی برداشت و پایش دقیق: الزام به نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری، ثبت برخط داده‌های برداشت و اعمال سقف برداشت مجاز مبتنی بر بیلان آبخوان و شرایط سطح آب (به‌ویژه در سال‌های خشک).
۳. کاهش برداشت از مسیر افزایش بهره‌وری مصرف: توسعه و حمایت از آبیاری تحت فشار و برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، با هدف کاهش برداشت سالانه و انتقال تدریجی به الگوی آبیاری با تلفات کم و راندمان بالا.
- ### منابع
- Azizi Q, 2004. The relationship between recent droughts and groundwater resources in the Qazvin plain, *Geographical Research*, 46, 143-131. (In Persian)
- Boroumand, A. and Karimi, S. (2024). Synthesis of Ecological, Economic, and Social Effects of Water Transfer Projects. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(3), 1-16. doi: 10.22067/jwsd.v11i3.2408-1358. (In Persian)
- Eslamian S, Nasri M, and Rahimi N, 2009. Study of wet and drought periods and their effects on changes in water resources in the Boyin Plain watershed. *Geography and Environmental Planning*, 1 (33), 90-75. In Persian.
- Ghafari, H. , Rasoulzadeh, A. , Raoof, M. and Esmeali, A. (2023). Estimation of Natural Recharge of Ardabil Aquifer Using CRD Method. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 53(110), 115-124. doi: 10.22034/jcee.2021.37698.1893. (In Persian)
- Gibbs UWJ, and Maher JV, 1967. Rain all Deciles as Drought Indicators, *Bulletin no 48 Bureau of Meteorology*, Australia. 609928.
- Histal H, Tallaksen LM, and Desemer U, 2003. UDrought Event Difinition. Technical Report, 81 (3), 230-247, doi.org/10.1016/S0022-1694(03) 00233-6
- Kaboli R, Zeinalzadeh H, and Khosravi A, 2024. Strategic evaluation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS in arid regions of southeastern Iran (Goharkuh Plain). *Environmental Science and Pollution Research*, 31 (2243), 25-44, Doi.org/10.1007/s13201-024-02243-x.
- Khasraei A, Zare Abyaneh H, Jovzi M, and Albaji M, 2025. Long-term monitoring and evaluation of drought and determining the accuracy of its indicators in western Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 27(7), 16295-16318. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04608-3.
- Khoshakhlaq, F., Azizi Q., Rahimi M. 2012. Synoptic patterns of winter drought and wetness in southwestern Iran12 (25): 57-77. doi: 2.189.160.148/fa/article/303897 (In Persian)
- Kord M, Asghari Moghaddam A, and Nakhaei M, 2019. Numerical modeling of the Ardabil plain aquifer and its management using optimization of Groundwater extraction. *Hydrogeology*, 4(1), 153-167. doi: 10.22034/hydro.2019.7571
- Lamb P, 1982. Persistence of sub Saharan Drought, *Nature Publishing Group UK*, 299 (5878), 46-48. doi:10.1038/299046a0

River Basin (1978–2018). *Environmental Science and Pollution Research*, 32(5), 37387. doi.org/10.1007/s11356-025-37387-z.