Original Article

Journal of Aquifer and Qanat

Spring and Summer 2023, Vol. 4, No. 1, pp 16-29

10.22077/jaaq.2023.5153.1046

Investigating The Effect Of Temporal And Spatial Variations On Groundwater Piezometric Monitoring Network Design Using Principal Components Analysis (PCA)

Samira Rahnama [1] | **Abbas Khashei-Siuki** [2] | **Ali Shahidi** [3]

1. PhD Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Associate professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
4. Department of Research Group of Drought and Climate Change, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: Samira.rahnama1369@gmail.com

Received:
20 February 2022

Accepted:
22 March 2022

Published:
20 January 2024

Keywords:

Effective well, Groundwater, Neyshabour plain, Principal Component Analysis

Extended abstract

Introduction

Identifying the number of wells in groundwater level estimation is an important step in terms of reducing the maintenance cost and saving the cost of harvesting information. Principal Component Analysis (PCA) is one of the techniques that reduce data and play a significant role in identifying low data. In this research, the average annual groundwater level of 51 wells in Neyshabour plain with a statistical period of 10 years (2010-2019) was studied using statistical analysis of the main components of the wells to determine the level of groundwater level in this plain. Using PCA, the relative importance of each well was calculated between 0 (for completely ineffective wells) to 1 (for very effective wells). The results showed that among the 51 wells in the studied area, 27 wells are considered as wells, and the remaining wells are considered as low-level wells. By eliminating 24 fewer wells, the estimated groundwater level error in the studied area is 26% higher than that used for all wells. Also, to take into account the factor of time, changes in this method were done in two 5-year periods. The results showed that 42 wells were selected as effective wells during the first 5-year period (2010-2014), which was reduced to 35 wells during the next 5 years (2015-2019).

Cite this article: Rahnama, S., Khashei-Siuki, A. & Shahidi, A. (2023). Investigating the effect of temporal and spatial variations on groundwater piezometric monitoring network design using principal components analysis (PCA). *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (1), 16-29. DOI: http//doi.org/10.22077/jaaq.2023.5153.1046

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

To manage groundwater resources efficiently and effectively, and to reduce the cost of drilling sampling wells, properly designed monitoring networks can be considered as an option. In general, monitoring is the fundamental basis of agricultural planning and exploitation of different development systems. One of the parameters that is of particular importance in the monitoring of groundwater quantity is the water level. Therefore, this parameter should be measured or estimated as accurately as possible. In this research, the average annual groundwater level of 51 wells in Neyshabour plain with a statistical period of 10 years (2010-2019) was studied using statistical analysis of the main components of the wells to determine the level of groundwater level in this plain.

Materials and Methods: The area studied in this research is the alluvial aquifer of the Neyshabour watershed. In this research, the average annual groundwater level statistics of 51 wells monitored by the Ministry of Energy have been used. The annual data of the underground water level of these wells, recorded from 2010 to 2019, was used in the data analysis. Figure 1 shows the geographic location of the study area and the distribution of water wells in the area. To calculate the importance of each well, the correlation coefficient between the principal components and the observed data is used. In this research, to calculate the relative importance of each well for each of the wells, the number of 10 wells with the closest neighborhood to the desired well was identified. According to a general rule, the number of wells (p) should be less than or at most equal to the number of observations (n) (which here is the same number of statistical years). In the selection of effective wells, the wells with a correlation coefficient less than 0.9 were excluded. Thus, for each time of principal component analysis, several wells were identified as effective wells, and finally, the number of times each well participated in the analysis and also the number of times it was identified as effective wells were determined. Finally, to check the effect of removing each well from the calculations, two criteria of coefficient of variation and monitoring error were used. To consider time changes in the selection of effective wells, an analysis of the main components was performed in two 5-year periods (2010-2014) and (2015-2019).

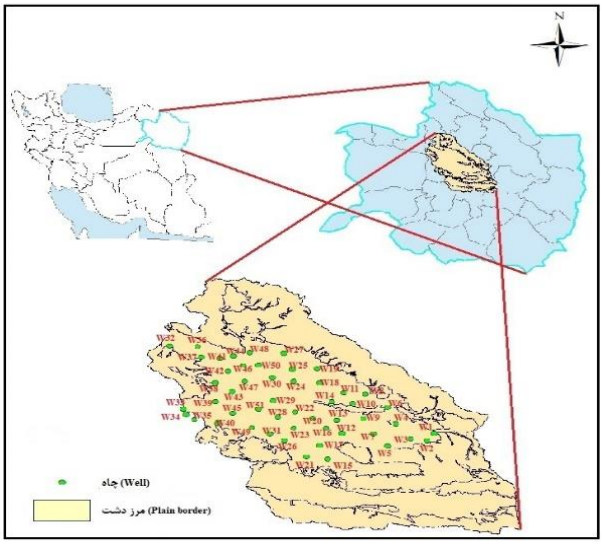


Fig 1. Location of the study area and wells

Results: The obtained results showed that for the aquifer of Neyshabour Plain, the acceptable threshold is 1, that is, among the 51 wells in the study area, 27 wells are known as effective wells, and the rest as less important wells. It will be at the same time, by removing unimportant wells, the error of estimating the underground water level of the studied area increases by 26% compared to the case where all wells are used. As shown in Figure 2, at Threshold 1, by removing a large number of wells, the threshold limit error has been greatly moderated and is very close to the situation where all wells are included in the calculations (threshold zero). The error value of threshold limit 1 is equal to 26%, that is, by removing 24 less important wells, the error of groundwater level

estimation increases by 26% compared to the case where all wells are used. Therefore, from the tracking error, the optimal threshold limit is 1. Therefore, the 27 wells that remain within this threshold can be considered effective wells in monitoring the water level of the Neyshabour Plain. Also, to take into account the factor of time, changes in this method were done in two 5-year periods. The results showed that 42 wells were selected as effective wells during the first 5-year period (2010-2014), which was reduced to 35 wells during the next 5 years (2015-2019).

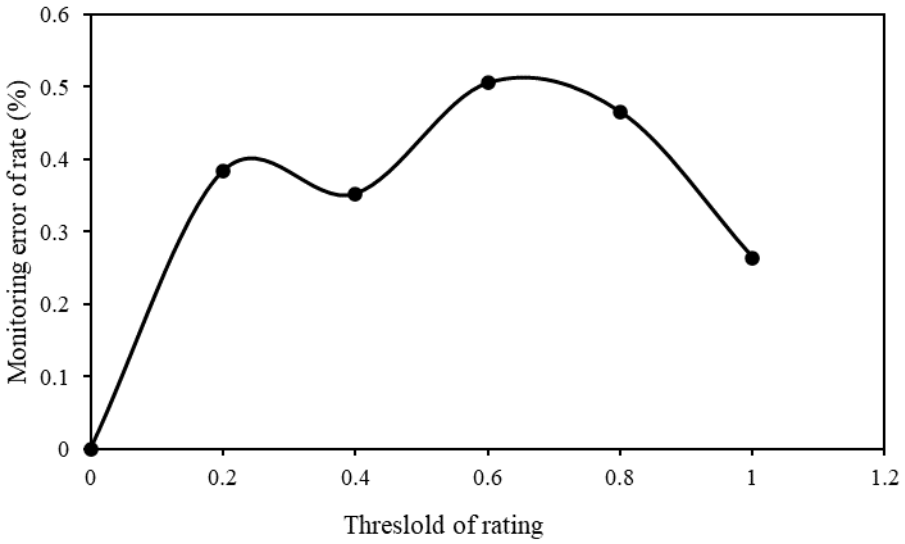


Fig 2. Monitoring error rate against the rating threshold

Conclusion: Principal component analysis is one of the methods that can be used to summarize data and reduce sampling points. In this way, by identifying more important wells and removing ineffective wells, it is possible to save a lot of money and time.

مقاله پژوهشی

مجله
آبخوان و قنات

دوره چهارم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲، صفحات ۲۹ - ۱۶

10.22077/jaaq.2023.5153.1046

بررسی تأثیر تغییرات زمانی و مکانی بر طراحی شبکه پایش پیزومتری آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

سمیرا رهنما [۱] ✉ | عباس خاشعی سیوکی [۲] | علی شهیدی [۳ و ۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۴-گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

✉نویسنده مسئول: Samira.rahnama1369@gmail.com

چکیده

شناسایی تعداد چاه‌ها در تخمین سطح آب زیرزمینی به‌لحاظ کاهش هزینه نگه‌داری و صرفه‌جویی در هزینه برداشت اطلاعات، گامی مهم می‌باشد. آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) یکی از ویژگی‌های کاهش داده می‌باشد که در شناسایی داده‌های کم‌اهمیت، نقش به سزایی دارد. در این پژوهش، میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی ۵۱ چاه بهره‌برداری دشت نیشابور با طول آماری ۱۰ ساله (۱۳۹۸-۱۳۸۹) با استفاده از تکنیک آماری آنالیز مؤلفه‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفت تا چاه‌های مؤثر در تعیین تراز سطح آب زیرزمینی این دشت مشخص گردد. با انجام آنالیز مؤلفه‌های اصلی، اهمیت نسبی هر چاه بین صفر (برای چاه غیر مؤثر) تا ۱ (برای چاه کاملاً مؤثر) محاسبه شد. نتایج نشان داد که از بین ۵۱ چاه موجود در منطقه مورد مطالعه، ۲۷ چاه به‌عنوان چاه مؤثر و بقیه چاه‌ها به‌عنوان چاه‌های کم‌اهمیت شناخته می‌شوند. یعنی با حذف ۲۴ حلقه چاه کم‌اهمیت، خطای برآورد سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه ۲۶ درصد نسبت به حالتی که از همه چاه‌ها استفاده می‌گردد، افزایش می‌یابد. هم‌چنین جهت در نظر گرفتن عامل زمان در تغییرات این روش در دو دوره زمانی ۵ ساله انجام شد. نتایج نشان داد که در دوره زمانی ۵ ساله اول (۱۳۹۳-۱۳۸۹) ۴۲ چاه به‌عنوان چاه بااهمیت انتخاب شدند که در دوره زمانی ۵ سال بعد (۱۳۹۸-۱۳۹۴) این تعداد به ۳۵ چاه تقلیل پیدا کرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

کلیدواژه‌ها:
آب زیرزمینی،
دشت نیشابور،
چاه مؤثر،
آنالیز مؤلفه‌های اصلی.

مقدمه

به‌منظور مدیریت کارا و مؤثر منابع آب زیرزمینی، برای کاهش حفر چاه‌های نمونه‌برداری که پر هزینه هستند، شبکه‌های پایشی که به‌طور مناسبی طراحی شده باشند، می‌توانند به‌عنوان یک گزینه در نظر گرفته شوند. به‌طور کلی پایش، مبنای اصولی برنامه‌ریزی زراعی و بهره‌برداری سامانه‌های مختلف توسعه می‌باشد. یکی از پارامترهایی که در پایش کمی آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، سطح ایستابی می‌باشد. لذا باید این پارامتر را تا حد امکان با دقت بالایی اندازه‌گیری کرد یا تخمین زد. روش‌های پایش به دو روش آماری و زمین‌شناسی انجام می‌گیرد (Helena et al., 2000). در روش‌های آماری از روش‌های پیشرفته آماری مثل زمین آمار و روش‌های نوین مثل شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد و شامل روش‌های شبیه‌سازی، تحلیل واریانس و روش‌های احتمالاتی می‌باشد. ولی روش‌های زمین‌شناسی بر اساس کمیت و کیفیت اطلاعات زمین شناسی و آب‌های زیرزمینی استوار می‌باشد (Lucas and Jauzein, 2008). آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) یک روش بهینه ریاضی برای کاهش حجم داده‌ها و تبدیل متغیرهای اولیه به چند مؤلفه محدود است (Jolliffe, 2000) که برای پایش شبکه آب زیرزمینی استفاده گردیده‌است. آنالیز مؤلفه‌های اصلی با توجه به میزان همبستگی یا کوواریانس بین چاه‌ها یا نقاط اندازه‌گیری، مؤلفه‌های اصلی یا نهان را تعریف می‌کند (Ouyang, 2005). به این ترتیب می‌توان پس از شناسایی مؤلفه‌هایی که بیشترین تغییرات واریانس را ایجاد می‌کنند، متغیرهایی را که بالاترین ضریب همبستگی را با مؤلفه‌های اصلی دارند، استخراج کرد. آنالیز مؤلفه‌های اصلی، به‌طور وسیع در آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود (Siyue, 2000) که در ادامه به ذکر برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

پژوهشگرانی چون گوروناتان و راویچاندران (Gurunathan and Ravichandran, 1994) از روش PCA برای شناسایی کیفیت آبخوان‌های آزاد ایتالیا استفاده کردند. آن‌ها در این پژوهش تبخیر، سیکل آبیاری و جنس سنگ‌بستر را به‌عنوان متغیرهای اصلی معرفی نمودند. در پژوهشی توسط سانچز مارتوس و همکاران (Sanchez-Martos et al., 2001) از تکنیک آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای تعیین متغیرهای مؤثر در آنالیز کیفیت آب زیرزمینی در تعدادی از چاه‌های واقع در ایالت آلمریا در اسپانیا استفاده کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سه متغیر سولفات، دما و موجودات زنده بیش‌ترین تأثیر را در تغییر کیفیت آب زیرزمینی داشته‌اند. همچنین، از روش PCA جهت ارزیابی کیفیت آب شبکه پایش رودخانه سنت جانز فلوریدای آمریکا توسط اویانگ (Ouyang, 2005) استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده کلسیم، منیزیم، قلیائیت، نیتروژن کل، نیترات محلول و نیتریت از جمله پارامترهای مؤثر در ارزیابی کیفیت آب این رودخانه می‌باشند. در پژوهشی مشخصات بارش سالانه شهر زنجان به‌کمک آنالیز مؤلفه‌های اصلی بررسی شد. نتایج نشان داد که با چهار مؤلفه می‌توان بیش از ۹۵ درصد از تغییرات بارش سالانه را توضیح داد (Asakareh and Bayat, 2013). در پژوهشی (Hu et al., 2013) به‌منظور بررسی افزایش میزان فلوراید در آب شرب در ۱۱۱ چاه واقع در دو منطقه شانکزی و اینر مانگولیا در چین، روش PCA را به کار بردند. بر اساس نتایج آن‌ها، افزایش میزان فلوراید در منطقه مانگولیا، عمدتاً ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و معدن کاوی است. در پژوهشی عوامل مؤثر در افزایش ماده آترازین را با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی در ۶۰ چاه واقع در آبخوان‌های کم عمق آلمان مورد بررسی قرار گرفت (Venberg et al., 2014). آن‌ها در این پژوهش نشان دادند که کاربری کشاورزی مهم‌ترین منبع آلاینده آترازین در این مناطق می‌باشد. در رودخانه کارون نیز با استفاده از روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تحلیل فاکتورهای اصلی (FA)، ارزیابی ایستگاه‌های کنترل پارامترهای کیفی آب رودخانه صورت گرفته است (Noori et al., 2007). در پژوهشی به‌منظور پایش کمی آبخوان دشت بیرجند و تعیین نقاط بهینه پیزومترها یک روش جدید تحت عنوان GNM را پیشنهاد دادند. در روش پیشنهاد شده از دو مدل شبکه عصبی و جستجوی گرگ خاکستری به‌عنوان مدل شبیه‌ساز سطح آب زیرزمینی و مکان‌یابی موقعیت پیزومترها استفاده کردند. نتایج نشان داد با توجه به مقادیر شاخص‌های ارزیابی در قسمت

شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی مدل GNM که با استفاده از شبکه عصبی انجام شد، مدل پیشنهادشده از کارایی مناسبی در این زمینه برخوردار بود. در نهایت موقعیت ۱۰ پیزومتر جدید در آبخوان بیرجند با استفاده از مدل GNM تعیین شد (Jafarzadeh and Khashei-siuki, 2018). پژوهشی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO به‌منظور تعیین تعداد و موقعیت بهینه چاه‌های مشاهداتی توسط انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد تعداد چاه‌های مشاهده‌ای برابر ۲۸ حلقه (۴۲ چاه مشاهده‌ای) می‌باشد که بیان‌کننده کاهش ٪ ۵۵ تعداد پیزومترها نسبت به‌حالت اولیه است (Kavusi et al., 2019). شبیه‌سازی عددی روند تغییرات کروم در آبخوان دشت بیرجند در پژوهشی توسط فرپور و همکاران (Farpoor et al., 2019) انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات غلظت این آلاینده به نوسانات سطح آب زیرزمینی بستگی دارد و با افزایش سطح تراز آب می‌توان میزان کروم را در آبخوان کاهش داد. پژوهشی به‌منظور تعیین چاه‌های مؤثر کیفیت آب (۱۱ پارامتر کیفی آب) دشت گناباد با استفاده از روش PCA انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که از بین ۲۲ حلقه چاه منطقه مورد مطالعه، ۷ حلقه چاه به‌عنوان چاه‌های مؤثر کیفی این دشت شناسایی شد که از پراکندگی مناسبی در منطقه برخوردار بودند (Rahnama et al., 2021).

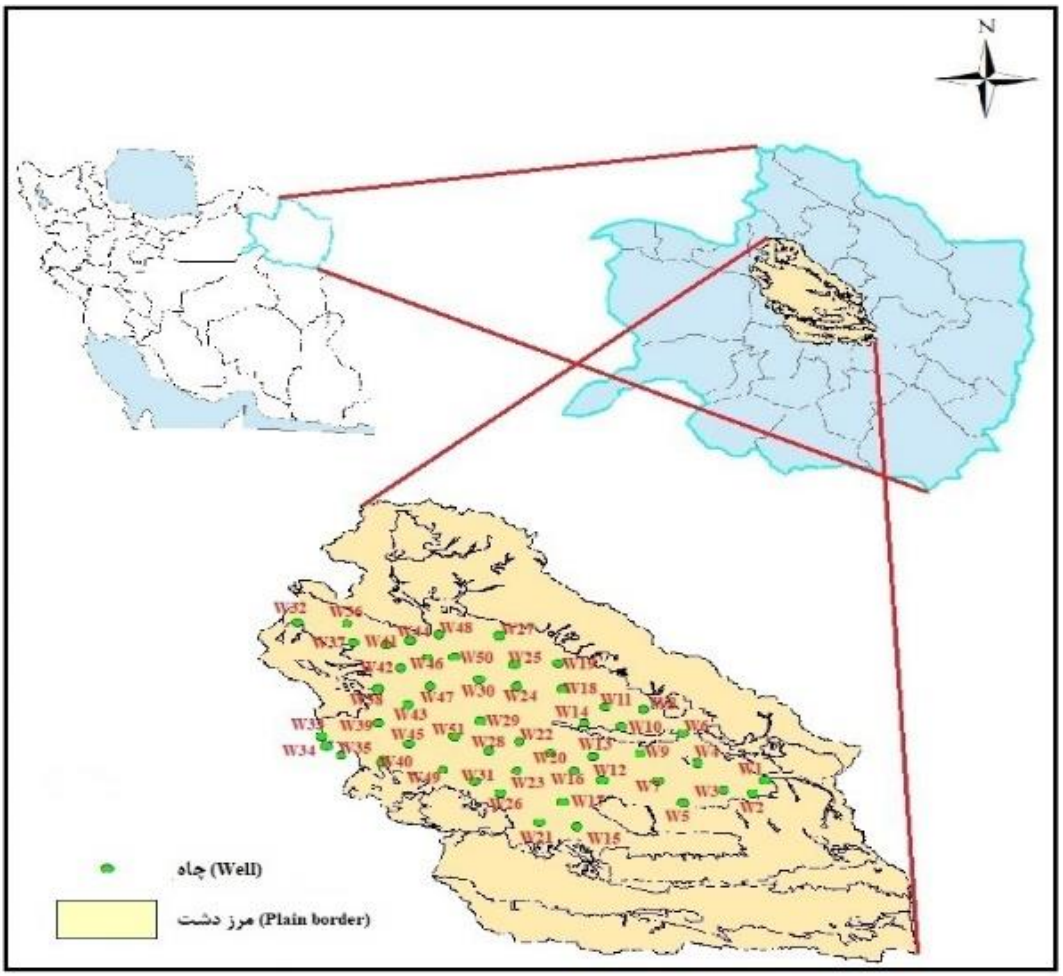
شناسایی تعداد چاه‌ها در تخمین سطح آب زیرزمینی به‌لحاظ کاهش هزینه نگه‌داری و صرفه‌جویی در هزینه برداشت اطلاعات، گامی مهم می‌باشد. از آنجا که استفاده از اطلاعات آماری تمامی چاه‌ها سبب پیچیدگی مدل‌سازی می‌شود، لذا با شناسایی چاه‌های مؤثر می‌توان بر حسب دقت مورد نیاز، پایش و مدل سازی را صرفاً به این چاه‌ها محدود کرد و در هزینه و زمان تا حد زیادی صرفه‌جویی نمود. بنابراین بررسی توانایی روش PCA در طراحی شبکه پایش با عنایت به تأثیر گذشت زمان‌بر شناسایی چاه‌های نمونه‌برداری مؤثر در آبخوان دشت می‌تواند نوآوری‌های این پژوهش باشد که در سایر پژوهش‌ها به آن پرداخته نشده است. لذا در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان یک روش کاهش داده اقدام به شناسایی چاه‌هایی شد که بیشترین تأثیر را در پایش سطح ایستابی دشت نیشابور دارند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، آبخوان آبرفتی حوضه آبریز نیشابور می‌باشد. حوضه آبریز نیشابور در عرض شمالی ′۴۰ °۳۵ تا ′۳۹ °۳۶ و طول شرقی ′۱۳ °۵۸ تا ′۳۰ °۵۹ با حداکثر ارتفاع ۳۳۰۵ متر در کوهستان بینالود و حداقل ارتفاع ۱۰۵۶ در خروجی حسین‌آباد جنگل می‌باشد. این حوضه دارای وسعت ۹۱۵۷ کیلومترمربع می‌باشد که ۴۲۴۱ کیلومترمربع را ارتفاعات و ۴۹۱۷ کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. دشت نیشابور در محدوده ارتفاعات بینالود دارای بافت آبرفتی و تحت‌تأثیر تغذیه سطحی و زیرزمینی قرار دارد و در نیمه جنوبی و غربی دارای بافت ریزدانه آبرفتی و سازنده‌ای دانه‌ریز مارنی و سایر رسوبات تبخیری است که سبب شده از نظر دانه‌بندی این قسمت از آبرفت مطلوب نباشد (Velayati and Tavasoli, 1991). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نحوه پراکنش چاه‌های آب منطقه نمایش داده شده است.

در این پژوهش، از آمار میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی ۵۱ حلقه چاه نظارت شده توسط وزارت نیرو، استفاده شده است. داده‌های سالانه سطح آب زیرزمینی این چاه‌ها که از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۸ ثبت گردیده، در آنالیز اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و چاه‌های مشاهداتی

Fig. 1. Location of the study area and wells

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

PCA از جمله روش‌های آماری چند متغیره محسوب‌می‌شود که جهت کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه مسئله در مواردی که با حجم زیادی از اطلاعات روبه‌رو هستیم و تفسیر بهتر آن‌ها استفاده می‌شود (Noori et al., 2009).

هدف از تحلیل مؤلفه‌های اصلی کاهش ابعاد داده‌ها (کاهش تعداد متغیرها) از طریق خلاصه‌سازی تعداد زیادی متغیر اولیه به تعداد کم‌تری مؤلفه اصلی است. برای این منظور، واریانس موجود در داده‌های چند متغیره به مؤلفه‌هایی تجزیه می‌شوند؛ چنان‌که نخستین مؤلفه اصلی (PC1) تا آنجا که ممکن است، بیش‌ترین واریانس موجود در داده‌ها را توجیه کند. دومین مؤلفه اصلی (PC2) بیش‌ترین واریانس ممکن بعد از مؤلفه نخست را توجیه کند و تا آخر. مؤلفه‌های استخراج‌شده دارای دو ویژگی هستند: الف) دو به دو بر هم عمودند (مستقل از یکدیگر هستند)، ب) تعداد کل مؤلفه‌های اصلی با تعداد متغیرهای اولیه برابر است. نکته مهم در مورد مؤلفه‌های اصلی آن است که این مؤلفه‌ها با چرخش محورهای مختصات در راستای بیش‌ترین واریانس به‌دست می‌آیند؛ چنان‌که زاویه بین محورهای مختصات پس از دوران تغییر نمی‌کند (Bazrafshan and Hejabi, 2017).

برای محاسبه اهمیت هر چاه، از ضریب همبستگی بین مؤلفه‌های اصلی و داده‌های مشاهده‌شده استفاده می‌شود. ضریب همبستگی چاه با مؤلفه اصلی از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$Cor\left(z_j, x_i\right) = a_{i,j+1}{}^{T} \lambda_j a_{i,j} \qquad (۱)$$

که در آن، $a_{i,j}$ عنصر i ام از مؤلفه اصلی j ام می‌باشد. هر چه این ضریب بالا باشد، نشان‌دهنده بالا بودن اهمیت نسبی چاه می‌باشد (Sanchez- Martos et al., 2001).

تعداد چاه‌ها (p) طبق یک قاعده کلی باید کم‌تر یا حداکثر برابر تعداد مشاهدات (n) (که در اینجا همان تعداد سال‌های آماری است) باشد (Petersen, 2001). در این پژوهش برای محاسبه اهمیت نسبی هر چاه به‌ازای هر یک از چاه‌ها، تعداد ۱۰ چاه با نزدیک‌ترین همسایگی با چاه مورد نظر، شناسایی شدند. تعداد چاه‌ها (p) طبق یک قاعده کلی باید کمتر یا حداکثر برابر تعداد مشاهدات (n) (که در این‌جا همان تعداد سال‌های آماری است) باشد (Petersen, 2001). به‌طور مثال برای پایش چاه W36، ۱۰ چاه مجاور یعنی W32، W37، W44، W41، W48، W46، W42، W38، W33، W50 مورد آنالیز قرار گرفته است. بنابراین، برای هر چاه یک ماتریس ۱۰×۱۰ وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است در پایش از داده‌های خود چاه استفاده نمی‌شود، بلکه تنها از ۱۰ چاه مجاور استفاده می‌شود. سپس، برای هر کدام از چاه‌ها یک‌بار آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام شد تا ضریب همبستگی هر چاه با مؤلفه اصلی مشخص شود. در انتخاب چاه‌های مؤثر، چاه‌هایی که ضریب همبستگی کمتر از ۰/۹ داشته‌اند، حذف گردید (NouriGheidari, 2013; Gurunathan and Ravichandran, 1994). بدین ترتیب برای هر بار آنالیز مؤلفه اصلی، تعدادی چاه به‌عنوان چاه مؤثر شناسایی شدند و در نهایت، تعداد دفعاتی که هر چاه در آنالیز شرکت کرده و همچنین تعداد دفعاتی که به‌عنوان چاه مؤثر شناخته‌شده است، مشخص شد. جهت مشخص کردن اهمیت نسبی هر چاه از رابطه (۲) استفاده گردید.

$$\text{Ralative importance} = \frac{N}{n} \qquad (۲)$$

این نسبت، نشان‌دهنده اهمیت هر چاه نسبت به سایر چاه‌ها می‌باشد که در آن، N تعداد دفعاتی که هر چاه به‌عنوان چاه مؤثر شناخته‌شده و n تعداد دفعاتی که هر چاه در آنالیز شرکت کرده می‌باشد. هر اندازه اهمیت نسبی یک چاه بیش‌تر باشد، تأثیر بیش‌تری در پایش خواهد داشت.

به‌منظور بررسی اثر حذف هر چاه از محاسبات از دو معیار ضریب تغییرات و خطای پایش استفاده شد. با استفاده از رابطه (۳) مقدار خطای پایش به‌ازای حذف چاه‌های غیر مؤثر در یک آستانه مشخص از مقایسه میانگین چاه‌های آن آستانه با میانگین کلیه چاه‌ها قابل‌محاسبه می‌باشد (Gurunathan and Ravichandran, 1994).

$$Error = \frac{(m_n - m_o)}{m_o} \qquad (۳)$$

که در آن، m_n متوسط مقادیر به‌ازای حذف چاه‌ها با توجه به اهمیت نسبی محاسبه‌شده، m_o متوسط مقادیر کلیه چاه‌های موجود می‌باشد. در این پژوهش برای پیاده‌سازی این روش از نرم‌افزار آماری SPSS Ver 19 استفاده گردید. جهت در نظر گرفتن تغییرات زمانی در انتخاب چاه‌های مؤثر، آنالیز مؤلفه‌های اصلی در دو دوره زمانی ۵ ساله (۱۳۹۳- ۱۳۸۹) و (۱۳۹۸- ۱۳۹۴) انجام شد. در این پژوهش برای پیاده‌سازی این روش از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده گردید.

نتایج و بحث

جدول (۱) ماتریس ضرایب همبستگی برای پایش چاه شماره ۳۶ را نشان‌می‌دهد. بر اساس این جدول سه مؤلفه PC1، PC2 و PC3 دارای واریانس بیشتری می‌باشند. مطابق جدول ۱ می‌توان چاه‌های W4، W5، W6، W3، W9، W11، W7 و W10 را که دارای ضریب همبستگی بالای ۰/۹ هستند، به‌عنوان چاه‌های مؤثر در پایش چاه W36 انتخاب نمود. این آنالیز برای ارزیابی اثر تمامی چاه‌ها انجام می‌گیرد تا تعداد دفعاتی که هر چاه مؤثر واقع می‌شود، تعیین گردد. سپس با توجه به مشخص بودن تعداد دفعاتی که یک چاه در آنالیز مؤلفه‌های اصلی شرکت داده شده است، اهمیت نسبی هر چاه محاسبه می‌شود. جدول ۲ اهمیت نسبی هر چاه را برای منطقه مورد مطالعه نشان‌می‌دهد. هر چاهی که دارای رتبه بالاتری باشد، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

جدول ۱. ماتریس ضریب همبستگی برای پایش چاه W_{36}

Table 1. Correlation Coefficient Matrix of W_{36} Well Monitoring

مؤلفه‌های اصلی (PC_j) Principal Component (PCj)			چاه‌ها Wells (W_i)
PC_3	PC_2	PC_1	
0.316	0.827	0.416	W_{32}
0.214	-0.159	0.915	W_{33}
0.861	-0.229	-0.416	W_{37}
0.512	0.449	0.586	W_{38}
-0.237	0.884	-0.382	W_{41}
-0.028	-0.074	0.917	W_{42}
-0.084	0.264	0.929	W_{44}
-0.136	0.065	0.962	W_{46}
-0.442	-0.161	0.822	W_{48}
0.259	-0.362	0.889	W_{50}

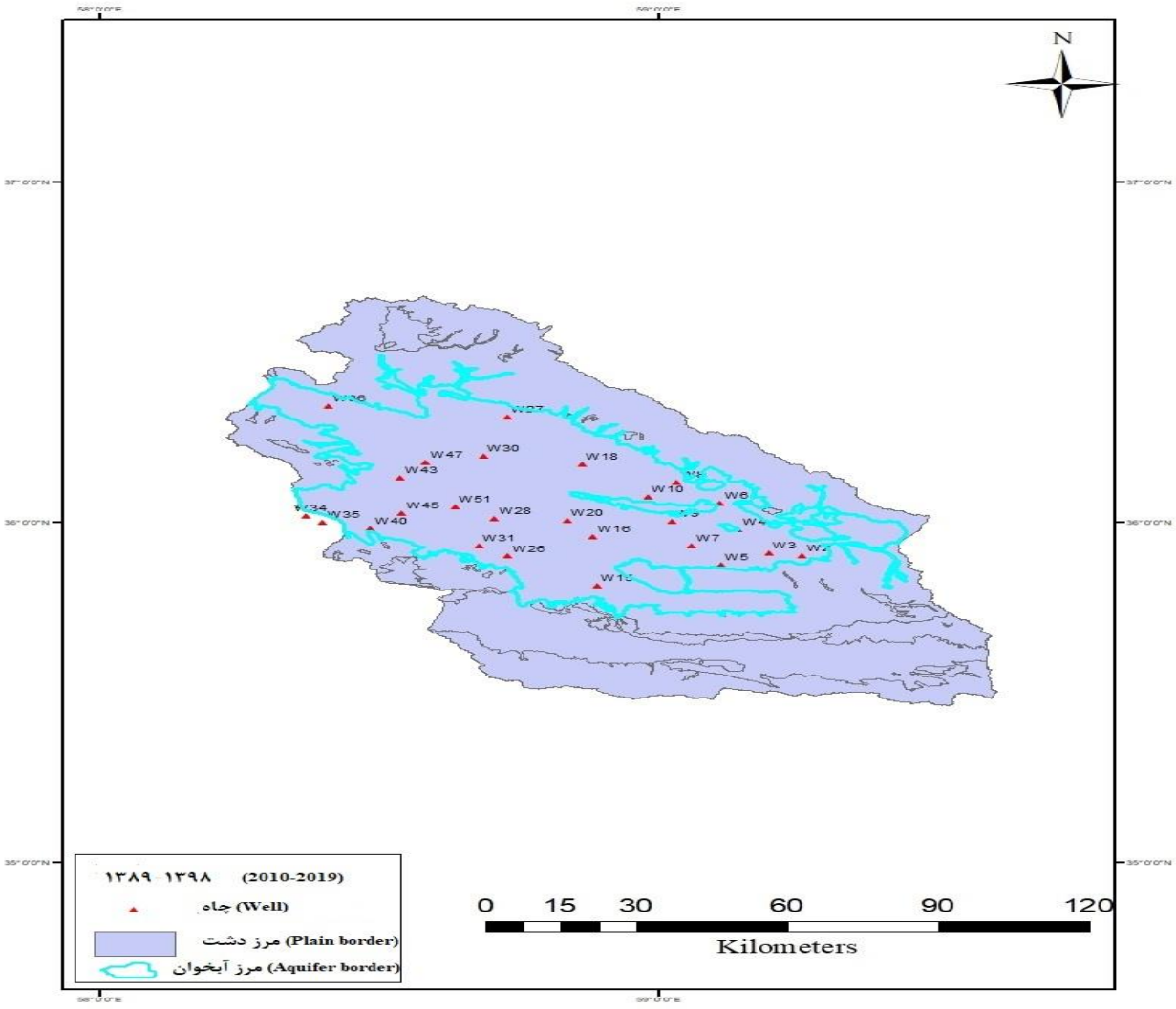
چنان‌چه برای رتبه بندی چاه‌ها، حدود آستانه برابر با ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شود. در آستانه ۰، کلیه چاه‌ها در آنالیز شرکت داده می‌شوند و در آستانه ۱، چاه‌هایی که دارای رتبه ۱ هستند، مورد قبول واقع می‌شوند (Nouri Gheidari, 2013; Rahnama et al., 2021). با توجه به جدول ۲ تعداد ۲۷ چاه با رتبه ۱ وجود دارد. به این معنی که این ۲۷ چاه از بالاترین اهمیت برخوردارند و به همان تعداد که در آنالیز شرکت کرده‌اند، به‌عنوان چاه مؤثر شناخته شده‌اند. تعداد چاه‌های مؤثر برای هر آستانه به‌ترتیب برابر با ۵۱، ۴۰، ۳۸، ۳۷، ۳۵ و ۲۷ خواهد بود. شکل ۲ جانمایی چاه‌های مؤثر را در منطقه مورد مطالعه طی دوره زمانی ۱۰ ساله ۱۳۹۸-۱۳۸۹ نشان‌می‌دهد.

جدول ۲. رتبه‌بندی چاه‌ها بر اساس آنالیز مؤلفه‌های اصلی ماتریس ضریب همبستگی برای پایش چاه W_{36}

Table 2. Correlation Coefficient Matrix of W_{36} Well Monitoring

رتبه Rank	تعداد دفعاتی که در آنالیز شرکت کرده‌اند. Number of times they participated in the analysis	تعداد دفعاتی که به عنوان چاه مؤثر شناخته شده است. The number of times it has been identified as an effective well	چاه Well	رتبه Rank	تعداد دفعاتی که در آنالیز شرکت کرده‌اند. Number of times they participated in the analysis	تعداد دفعاتی که به عنوان چاه مؤثر شناخته شده است. The number of times it has been identified as an effective well	چاه Well
1.00	11	11	W_{33}	1.00	4	4	W_{36}
0.93	13	13	W_{46}	1.00	7	7	W_{27}
0.93	14	13	W_{12}	1.00	12	12	W_{30}
0.92	14	12	W_{29}	1.00	14	14	W_{47}
0.92	13	12	W_{49}	1.00	11	11	W_{43}
0.91	13	10	W_{39}	1.00	5	5	W_{34}
0.91	11	10	W_{23}	1.00	5	5	W_{35}
0.87	11	13	W_{50}	1.00	8	8	W_{40}
0.86	15	6	W_{1}	1.00	11	11	W_{45}
0.75	7	9	W_{42}	1.00	15	15	W_{51}
0.63	12	5	W_{19}	1.00	10	10	W_{18}
0.50	8	4	W_{11}	1.00	11	11	W_{20}
0.27	8	3	W_{44}	1.00	8	8	W_{26}
0.21	11	3	W_{22}	1.00	7	7	W_{31}
0.08	14	1	W_{38}	1.00	8	8	W_{28}
0.08	12	1	W_{24}	1.00	6	6	W_{8}
0.00	12	0	W_{32}	1.00	10	10	W_{10}

0.00	4	0	W_{37}	1.00	18	18	W_{16}
0.00	6	0	W_{41}	1.00	11	11	W_{6}
0.00	10	0	W_{48}	1.00	14	14	W_{9}
0.00	11	0	W_{25}	1.00	7	7	W_{4}
0.00	5	0	W_{14}	1.00	8	8	W_{7}
0.00	11	0	W_{13}	1.00	3	3	W_{15}
0.00	18	0	W_{17}	1.00	6	6	W_{2}
0.00	8	0	W_{21}	1.00	7	7	W_{3}
				1.00	8	8	W_{5}

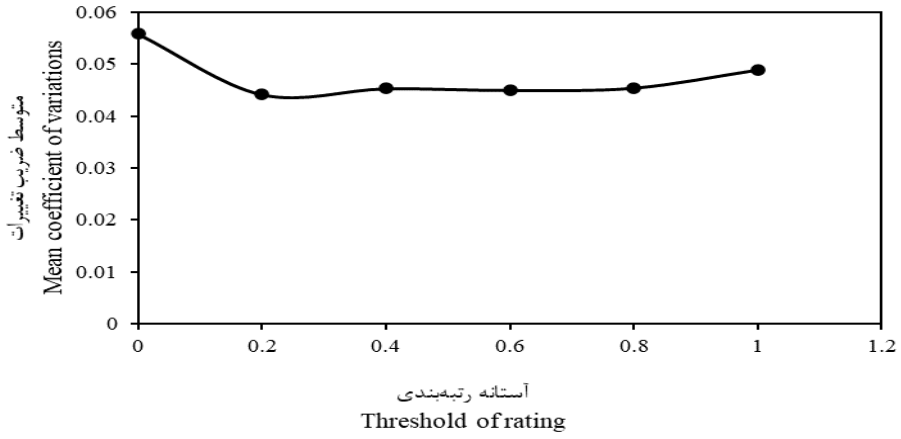


شکل ۲. جانمایی چاه‌های مؤثر در منطقه مورد مطالعه طی دوره ۱۳۹۸-۱۳۸۹

Fig 2. Location of effective wells in the study area during the period 2010-2019

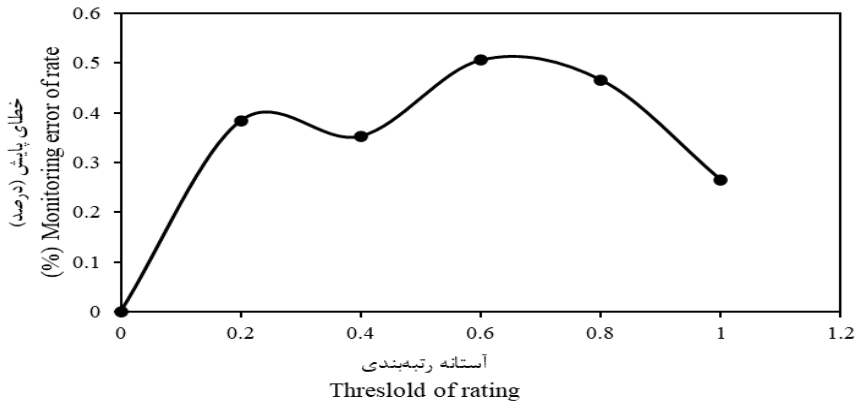
محققان جهت بررسی مقدار خطا در انتخاب تعداد چاه‌های مؤثر، محاسبه ضریب تغییرات برای چاه‌های باقی‌مانده در هر آستانه و مقایسه آن با ضریب تغییرات مربوط به کلیه چاه‌ها را پیشنهاد داده‌اند (NouriGheidari, 2013). این روش در صورتی قابل قبول می‌باشد که فرض شود ضریب تغییرات با حذف چاه‌های غیر مؤثر افزایش یابد. به این ترتیب آستانه‌ای که در آن کمترین اختلاف در ضریب تغییرات رخ دهد، انتخاب می‌شود. البته ذکر این نکته ضروری است که همیشه با حذف چاه‌های غیر مؤثر ضریب تغییرات افزایش نمی‌یابد (مانند پژوهش حاضر) و با توجه به ماهیت اطلاعات چاه‌های حذف‌شده، می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. لذا در پژوهش حاضر، برای انتخاب یک سطح آستانه قابل قبول علاوه بر محاسبه ضریب تغییرات، میانگین در محاسبه خطا به‌جای ضریب تغییرات استفاده می‌گردد (Babaeihessar, 2016).

در شکل ۳ متوسط ضریب تغییرات در مقابل حد آستانه رسم شده است. به این ترتیب که ضریب تغییرات برای هر سال آماری محاسبه و پس از برآورد مقدار متوسط آن، در مقابل حد آستانه رسم گردید. با توجه به‌شکل ۲ در آستانه ۰/۲ ضریب تغییرات کاهش می‌یابد. در آستانه ۰/۲ با حذف چاه‌های W38، W24، W37،W32، W41، W48، W25، W14، W13، W17 و W21 که متوسط مقادیر در آن‌ها بیشتر از میانگین مقادیر کلیه چاه‌ها می‌باشد و ضریب تغییرات به‌طور ناگهانی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. حذف چاه‌های کم‌اهمیت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که متوسط ضریب تغییرات زیاد نباشد. برای اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، مقدار خطا نیز برای هر آستانه محاسبه گردید. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در آستانه ۱ با حذف تعداد زیادی از چاه‌ها میزان خطای حد آستانه تا حد زیادی تعدیل شده است و بسیار نزدیک به وضعیتی است که کلیه چاه‌ها در محاسبات وارد می‌شوند (آستانه صفر). مقدار خطای حد آستانه ۱ برابر ۲۶ درصد می‌باشد، یعنی با حذف ۲۴ چاه کم‌اهمیت خطای برآورد سطح آب زیرزمینی ۲۶ درصد نسبت به حالتی که از تمام چاه‌ها استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد. بنابراین، از روی خطای پایش، حد آستانه مطلوب ۱ می‌باشد. از این رو، می‌توان ۲۷ چاهی را که در این حد آستانه باقی‌مانده‌اند، به‌عنوان چاه‌های مؤثر در پایش سطح ایستابی دشت نیشابور در نظر گرفت. پژوهشگرانی چون (NouriGheidari, 2013; Babaeihessar et al., 2016) به نتایج مشابهی در این زمینه دست یافتند. پژوهش خاشعی سیوکی و همکاران (Khasheisuiki et al., 2021) نیز نشان داد که از بین ۲۵ چاه موجود در آبخوان دشت بیرجند، می‌توان ۱۵ چاه به‌عنوان چاه شاخص کروم آب زیرزمینی آبخوان این دشت معرفی نمود که از پراکندگی خوبی در منطقه برخوردار هستند.



شکل ۳. متوسط ضریب تغییرات در مقابل حد آستانه رتبه‌بندی

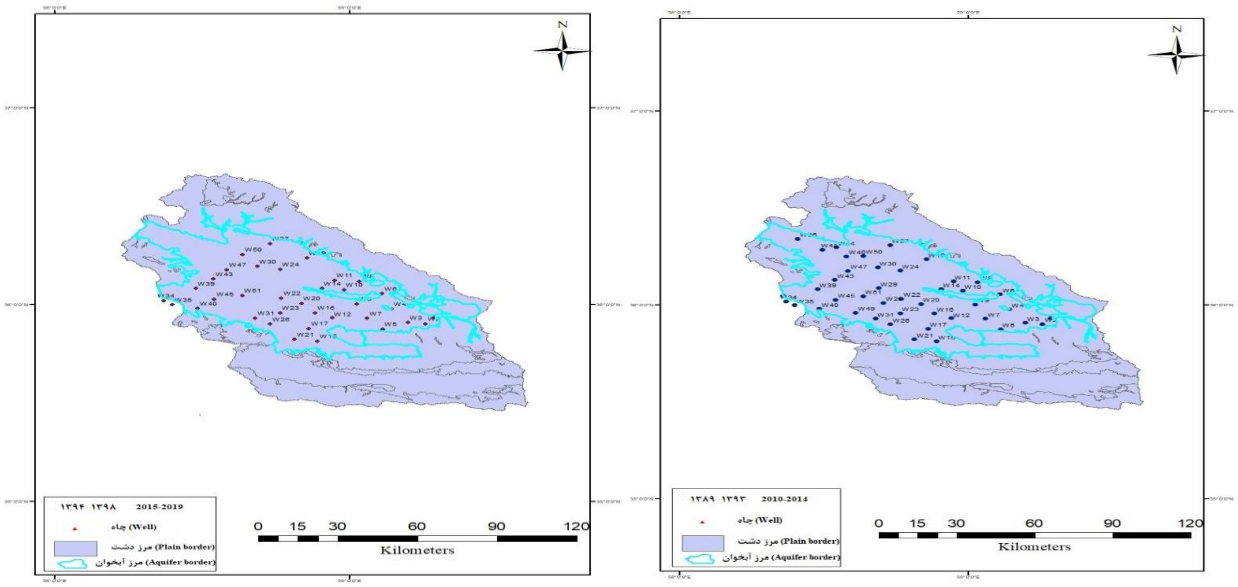
Fig 3. Average coefficient of variations against the threshold of rating



شکل ۴. میزان خطای پایش در مقابل حد آستانه رتبه‌بندی

Fig. 4. Monitoring error rate against the rating threshold

جهت در نظر گرفتن تغییرات طی دوره‌های زمانی مختلف، آنالیز مؤلفه‌های اصلی در انتخاب چاه‌های مؤثر، در دو دوره زمانی ۵ ساله (۱۳۹۳- ۱۳۸۹) و (۱۳۹۸- ۱۳۹۴) انجام شد. با توجه به‌شکل ۵ نتایج نشان داد که در دوره ۵ ساله اول یعنی طی سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۹ از مجموع ۵۱ چاه مورد مطالعه در منطقه ۴۲ چاه و در طی سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۹۴، ۳۵ چاه به‌عنوان چاه مؤثر انتخاب گردید. در این مدت، ۷ چاه W28، W29، W36، W41، W44، W46 و W49 حذف می‌شوند.



الف- دوره ۱۳۹۳-۱۳۸۹

(A) The period 2010-2014

(ب) دوره ۱۳۹۸-۱۳۹۴

(B) The period 2015-2019

شکل ۵. جانمایی چاه‌های مؤثر در تعیین تراز سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور طی دوره‌های زمانی مختلف

Fig 5. Location Of Wells Effective In Determining The Groundwater Level Of Neyshabour Plain During Different Periods

نتیجه‌گیری

آنالیز مؤلفه‌های اصلی از روش‌هایی است که می‌تواند برای خلاصه‌سازی داده‌ها و تقلیل نقاط نمونه‌برداری مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب با شناسایی چاه‌های با اهمیت بیشتر و حذف چاه‌های غیر مؤثر می‌توان تا حد بسیاری در هزینه و زمان صرفه‌جویی نمود. در این پژوهش با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی اهمیت نسبی هر چاه در تعیین تراز سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور محاسبه گردید. با انجام آنالیز مؤلفه‌های اصلی، اهمیت نسبی هر چاه بین صفر (برای چاه غیر مؤثر) تا ۱ (برای چاه کاملاً مؤثر) محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد

که برای آبخوان دشت نیشابور حد آستانه قابل قبول ۱ می‌باشد، یعنی از بین ۵۱ چاه موجود در منطقه مورد مطالعه، ۲۷ چاه به‌عنوان چاه مؤثر و بقیه چاه‌ها به‌عنوان چاه‌های کم‌اهمیت شناخته می‌شود. این در حالی است که با حذف چاه‌های کم‌اهمیت، خطای برآورد سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه ۲۶ درصد نسبت به حالتی که از همه چاه‌ها استفاده می‌گردد، افزایش می‌یابد. جهت در نظر گرفتن عامل زمان در تغییرات روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی در دو دوره زمانی ۵ ساله انجام گرفت. نتایج نشان داد که در دوره زمانی ۵ ساله (۱۳۹۳-۱۳۸۹) ۴۲ چاه به‌عنوان چاه مؤثر انتخاب شدند که در دوره زمانی ۵ سال بعد (۱۳۹۸-۱۳۹۴) این تعداد به ۳۵ چاه تقلیل پیدا کرد.

منابع

Asakareh, H. & Bayat, A. (2013). Principal component analysis of annual rainfall properties of Zanjan city. *Journal of Geography and Planning*, 45(17), 121-142 [In Persian].

Babaeihessar, S., Hamdami, Q. & Ghasemieh, H. (2016). Identify the Effective Wells in Determination of Groundwater Depth in Urmia Plain Using Principle Component Analysis. *Journal of Water and Soil*, 31, 10-50 [In Persian].

Bazrafshan, J. & Hejabi, S. (2017). *Drought Monitoring Methods*. University of Tehran Press [In Persian].

Farpoor, F., Ramezani, Y. & Akbarpour, A. (2019). Numerical Simulation of Chromium Changes Trend in Aquifer of Birjand Plain. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(5): 1203-1216 [In Persian].

Jafarzadeh, A. & Khasheisiuki, A. (2018). Performance examination of optimization model of groundwater monitoring network based on Gray wolf and Neural network (GNM) (Case study: Birjand plain). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 8, 121-139.

Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis. Springer series in statics, ISBN 978-0-387-95442-4.

Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Manuel, J. & Fernandez, L. (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer by principal component analysis. *Water Research*, 34(3): 807-816.

Hu S., Luo T. & Jing, C. (2013). Principal component analysis of fluoride geochemistry of groundwater in Shanxi and Inner Mongolia, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 135: 124–129.

Gurunathan, K. & Ravichandran, S. (1994). *Analysis of water quality data using a multivariate statistical technique- a case study.* IAHS Pub, 219.

Khashei Siuki, A., Shahidi, A. & Rahnama, S. (2021). Comparison of Birjand aquifer chromium monitoring network using principal component analysis (PCA) and entropy theory. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 209–220 [In Persian].

Kavusi, M., Khasheisiuki, A., Porrezabilondi, M. & Najafi, M. H. (2019). Application of New LSSVM-PSO Optimization-Simulation Model in Designing Optimal Groundwater Level Network Monitoring. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 5, 1306-1319.

Lucas, L. & Jauzein, M. (2008). Use of principal component analysis to profile temporal and spatial variations of chlorinated solvent concentration in groundwater. *Environmental Pollution*, 151: 205-212.

Noori, R., Kerachian, R., KhodadadiDarban, A. & Shakibaienia, A. (2007). Assessment of Importance of Water Quality Monitoring Stations Using Principal Components Analysis and Factor Analysis: A Case Study of the Karoon River. *Journal of Water and Wastewater*, 18(63): 60-69 [In Persian].

Noori, R., Abdoli, M. A., Ameri Ghasrodashti, A. & Jalili Ghazizade, M. (2009). Prediction of municipal solid waste generation with a combination of support vector machine and principal component analysis: A case study of Mashhad. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(2): 249-58.

NouriGheidari, M. H. (2013). Determination of Effective Wells to Monitor the Ground Water Level Using the Principal Components Analysis. Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, *Water and Soil Sciences*, 17(64): 149-158 [In Persian].

Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39: 2621-2635

Petersen, W. (2001). Process identification by principal component analysis of river water-quality data. Ecological Modelling. *Model*, 138: 193-213.

Rahnama, S., Khashei Siuki, A. & Shahidi, A. (2021). Designing a quality monitoring network of Gonabad Aquifer using the principal component analysis (PCA) method. *Water Harvesting Research*, 4(1): 69-76.

Sanchez-Martos, F., Jimenez-Espinosa, R. & Pulido-Bosch, A. (2001). Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: a case study of Bajo Andarax, southeastern Spain. *Hydrological Sciences Journal*, *46*(2): 227-242.

Siyue, L. (2009). Water quality in the upper Han River, China: The impacts of land use/land cover in the riparian buffer zone. *Hazardous Materials*, 165(1): 317-324.

Velayati, S. & Tavasoli, S. (1991). *Khorasan Water Resources and Issues*. Astan Quds Razavi Printing and Publishing Company, Mashhad [In Persian].