

## Research paper

### **Trend analysis of groundwater depth changes and drought assessment in the Mashhad-Chenaran aquifer with emphasis on the impact of land-use changes and climatic indices**

S.M. Alavizadeh<sup>1</sup> and H. Banejad<sup>2\*</sup>

## Extended Abstract

### **Introduction:**

Groundwater is a vital resource, particularly in arid and semi-arid regions, where surface water availability is limited. Sustainable groundwater management is crucial for balancing agricultural, industrial, and domestic consumption. However, excessive groundwater extraction, rapid urbanization, and climate variability have led to significant declines in groundwater levels worldwide. In Iran, one of the most concerning cases of groundwater depletion is observed in the Mashhad-Chenaran aquifer, which has experienced a persistent decrease in groundwater levels over the past decades. Understanding the factors influencing groundwater depletion is critical for developing appropriate mitigation strategies. Various studies have investigated the role of climate variability and human activities in groundwater level fluctuations. While precipitation deficits and prolonged droughts can contribute to declining groundwater recharge, human-induced factors such as land use changes, agricultural expansion, and unregulated groundwater extraction often play a more dominant role. Despite the importance of this issue, a comprehensive assessment combining groundwater trend analysis, drought evaluation, and land use change impacts remains limited in the Mashhad-Chenaran aquifer. Therefore, this study aims to analyze the long-term trend of groundwater level changes and groundwater drought conditions, with a particular emphasis on the impact of land use changes and climatic indices. By integrating hydrogeological, meteorological, and remote sensing data, this study provides a multifaceted approach to understanding groundwater depletion and its driving factors.

### **Materials and Methods:**

In this study, the trend of groundwater depth changes in Mashhad-Chenaran aquifer was analyzed using time-series data from 36 piezometers between 1989 and 2020. Modified Mann-Kendall and Sen's slope tests, along with the Pettitt test, were employed to examine groundwater depth trends and identify time-series breakpoints. The Mann-Kendall test is a non-parametric method widely used to identify monotonic trends in hydrological and environmental time series, while Sen's slope provides an estimate of the rate of change over

1- M.Sc. Graduate student in Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\* Corresponding Author: [banejad@um.ac.ir](mailto:banejad@um.ac.ir)

Received: 2024/12/29

Accepted: 2025/01/26

time. To further investigate the groundwater changes over the study period and evaluate groundwater drought conditions, the Standardized Groundwater Index (SGI) was calculated for each well. This index is particularly useful in distinguishing normal, moderately dry, severely dry, and extremely dry periods. By analyzing SGI over the 32-year study period, this research identifies critical drought periods and their spatial distribution across the aquifer. In addition, to assess the relationship between anthropogenic and meteorological droughts, Palmer Drought Index (PDSI) values at the location of each well were obtained from the TerraClimate product, and correlations between SGI and PDSI were calculated. To investigate the anthropogenic effects on groundwater depth changes, GLAD land cover maps from 2000 to 2020 were used. These maps, derived from Landsat satellite imagery, provide high-resolution information on urban expansion, agricultural growth, and natural land cover transformations. By comparing land use classifications at different time intervals, the study quantifies the extent of urbanization and agricultural intensification.

### **Result and Discussion:**

The trend analysis revealed that the most piezometers exhibit an increasing trend in groundwater depth, with one-quarter of them experiencing an increase in depth with a exceeding rate of one meter per year. Furthermore, the transfer of water resources to the city of Mashhad has led to some piezometers showing a decrease in depth and water table rise. The SGI index revealed that groundwater drought in a significant number of piezometers began between 2001 and 2006 and continues to intensify. Over 20 years, since 2000, urban land use within the aquifer region has doubled, reaching approximately 745 square kilometers, which has noticeably impacted some piezometers. Additionally, agricultural land use, the dominant land use type in this area, has increased by about 167 square kilometers. To further investigate the influence of land use and land cover types, the changes in urban and agricultural class were investigated over 5-year periods. While urban land use has been steadily increasing over the whole period, agricultural land use experienced significant growth between 1999 and 2004. This could be one of the reasons for the onset of the drought period and the presence of a breakpoint between 2001 and 2006 in many piezometers. To evaluate the impact of meteorological drought on groundwater drought, the correlation between the Standardized Groundwater Index (SGI) and the Palmer Drought Severity Index (PDSI) was calculated for each piezometer. The lack of correlation between these two indices in most piezometers suggests a significant role of human activities in groundwater level decline in the region.

**Keywords:** Standardized Groundwater Index (SGI), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Mann-Kendall Test, Trend Analysis.

**Citation:** Alavizadeh, S.M. and Banejad, H. 2025. Trend analysis of groundwater depth changes and drought assessment in the Mashhad-Chenaran aquifer with emphasis on the impact of land-use changes and climatic indices. *Iranian Water Research Journal*, 56, pp. 73-88. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15066.2657>



## تحلیل روند تغییرات عمق و خشکسالی آب‌های زیرزمینی در آبخوان مشهد-چناران با تأکید بر تأثیر تغییرات کاربری اراضی و شاخص‌های اقلیمی

سید محمد علوی‌زاده<sup>۱</sup> و حسین بانژاد<sup>۲\*</sup>

### چکیده

آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند آبخوان مشهد-چناران با چالش‌های مختلفی از جمله برداشت بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و خشکسالی مواجه‌اند. در این پژوهش، روند تغییرات عمق آب زیرزمینی این منطقه با استفاده از داده‌های سری زمانی ۳۶ پیزومتر بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۹ تحلیل شد. آزمون‌های من-کندال اصلاح‌شده و شیب سن و آزمون پتیت برای بررسی روند عمق آب و نقاط شکست سری زمانی به‌کار گرفته شدند. شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی (SGI) برای تحلیل خشکسالی آب زیرزمینی محاسبه و تأثیر تغییرات کاربری اراضی و خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص خشکسالی پالم (PDSI) بر تغییرات عمق آب زیرزمینی و خشکسالی آن بررسی شد. نتایج نشان داد بیشتر پیزومترها دارای روند افزایشی عمق آب زیرزمینی بوده و یک چهارم پیزومترها افزایش عمقی با مقدار شیب بالاتر از یک متر در سال را داشته‌اند. در شهر مشهد، به دلیل آب‌های انتقالی از خارج حوضه، برخی پیزومترها کاهش عمق را نشان دادند. شاخص SGI نشان داد که در تعداد قابل توجهی از پیزومترها خشکسالی آب زیرزمینی در بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ شروع و در طی سال‌های بعدی همچنان تشدید شده است. در طی ۲۰ سال، از سال ۱۳۷۸، کاربری شهری در محدوده آبخوان حدوداً دو برابر شده و به حدود ۷۴۵ کیلومتر مربع رسیده که تأثیر این موضوع در برخی پیزومترهای این مناطق مشخص است. تعدادی از پیزومترهایی که در مناطقی با تمرکز افزایش کاربری شهری قرار گرفته‌اند، شیب افزایش عمق نسبتاً بالایی (بالاتر از یک متر در سال) را داشته‌اند. کاربری کشاورزی، به عنوان کاربری غالب در این محدوده، حدود ۱۶۷ کیلومتر مربع افزایش داشته است، اما پراکندگی این افزایش باعث شده که تأثیر آن بر پیزومترها کمتر قابل مشاهده باشد. محاسبه همبستگی SGI و PDSI نشان داد که در بیشتر پیزومترها همبستگی بالایی وجود ندارد، که این امر نشان‌دهنده نقش پررنگ فعالیت‌های انسانی در افت سطح آب زیرزمینی منطقه است.

**واژه‌های کلیدی:** شاخص استاندارد آب زیرزمینی، شاخص خشکسالی پالم، آزمون من-کندال، تحلیل روند.

**ارجاع:** علوی‌زاده، سید محمد، و بانژاد، حسین، ۱۴۰۴. تحلیل روند تغییرات عمق و خشکسالی آب‌های زیرزمینی در آبخوان مشهد-چناران با تأکید بر تأثیر تغییرات کاربری اراضی و شاخص‌های اقلیمی. *مجله پژوهش آب ایران*، ۵۶، صص. ۷۳-۸۸. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2025.15066.2657>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\* نویسنده مسئول: [banejad@um.ac.ir](mailto:banejad@um.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

## مقدمه

آب‌های زیرزمینی که نزدیک به نیمی از جمعیت جهان برای تامین آب آشامیدنی، آبیاری و نیازهای صنعتی به آن وابسته‌اند، در سطح جهانی با چالش‌های شدیدی به دلیل افزایش جمعیت، برداشت بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های شدید مواجه شده است (Mahammad et al., 2021, Dangar et al., 2023). در مناطق خشک و نیمه‌خشک با بارندگی سالانه کم، آب‌های زیرزمینی منبعی اساسی برای تامین نیازهای خانگی و کشاورزی محسوب می‌شود. از این رو، در این نواحی، آبخوان‌ها ممکن است در معرض خطر برداشت بیش از حد و کاهش منابع قرار گیرند (Mirboluki et al., 2024). بسیاری از آبخوان‌های بزرگ در جهان به طور وسیعی مورد بهره‌برداری قرار دارند، در حالی که نرخ تغذیه‌ی آن‌ها بسیار اندک است. گزارش‌های متعددی از افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف جهان گزارش شده است مانند افت ۶۰ متر در بخش‌هایی از مصر، لیبی و سودان، افت ۵۰ متر در تگزاس و کنزاس آمریکا از دهه ۱۹۴۰ میلادی و افت‌های بیشتر از ۱۲۰ متر در شمال چین و هوستون آمریکا (Machiwal et al., 2018). در ایران نیز گزارش‌های نگران‌کننده‌ای در مورد برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. اندازه‌گیری‌های هارنخ کاهش سالانه نگران‌کننده‌ای در حدود ۵/۷ میلیارد متر مکعب بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ را نشان داده‌اند (Ashraf et al., 2021). به طور متوسط کشور با کمبود سالانه‌ی ۱۷۳۷ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی روبه‌رو است. در این میان استان‌های خراسان رضوی و کرمان با بیشترین کمبود آبی مواجه‌اند و هر سال به ترتیب در حدود ۳۸۰ و ۳۲۵ میلیون متر مکعب از ذخایر آب زیرزمینی خود را از دست می‌دهند (Haghighi and Motagh, 2024). بر اساس گزارش‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران بیش از ۸۰ درصد از آب مصرفی استان خراسان رضوی از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که بیش از ۹۰ درصد آن به بخش کشاورزی اختصاص دارد (Mirboluki et al., 2024).

از همین رو بررسی تغییرات کمی آبخوان اهمیت بالایی دارد. روش‌های مختلف تحلیل روند، مانند آزمون‌های اصلی و اصلاح‌شده من-کندال و آزمون گرافیکی تحلیل

روند نوآورانه (ITA<sup>۱</sup>)، توسط پژوهشگران برای ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده شده‌اند. بسیاری از مطالعات انجام‌شده در کشورهای مختلف به خصوص کشور هند، روند افزایشی عمق آب در بیشتر چاه‌های مشاهده‌ای را نشان داده‌اند (Nanditha et al., 2024, Roy et al., 2023, Sethi et al., 2024). در یک مطالعه در شمال عراق به بررسی روند سطح آب زیرزمینی با استفاده از آزمون‌های من-کندال اصلاح‌شده، تحلیل روند نوآورانه (ITA) و شیب سن پرداختند. نتایج این پژوهش کاهش سطح آب در این منطقه را نشان داده است (Mohammed et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر در پنجاب هند، تغییرات بلند مدت زمانی-مکانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از من-کندال اصلاح‌شده و شیب سن بررسی شد. نتایج بیانگر روند کاهشی سطح آب در بیشتر چاه‌ها بود (Sahoo et al., 2021). در پژوهشی در شمال هند علاوه بر بررسی تغییرات فصلی سطح آب زیرزمینی با روش من-کندال، شیب سن و همچنین رگرسیون خطی ساده، از آزمون پتیت برای بررسی نقاط شکست استفاده شد (Singh et al., 2020).

شاخص‌های متعددی برای بررسی کامل‌تر تغییرات سطح آب زیرزمینی و خشکسالی آن پیشنهاد شده است. یکی از شاخص‌های پر استفاده در این زمینه شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی (SGI<sup>۲</sup>) است که توسط بلومفیلد و مرشانت پیشنهاد شده است (Bloomfield and Marchant, 2013a). در مطالعه‌ای در هند در ابتدا به بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از من-کندال و شیب سن پرداخته شد. سپس از شاخص SGI برای بررسی خشکسالی آب زیرزمینی استفاده و همچنین تغییرات کاربری اراضی در منطقه بررسی شد (Halder et al., 2020). در تعدادی دیگر از پژوهش‌ها از این شاخص برای مقایسه خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی استفاده شده است (Secci et al., 2021, Babre et al., 2022). در مشهد برای بررسی ارتباط خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی، یک مطالعه از دو شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و خشکسالی آب زیرزمینی PSI استفاده شد. نتایج نشان داد ارتباط محسوسی بین این دو وجود نداشته و خشکسالی

1- Innovative Trend Analysis

2- Standardized Groundwater Index

آزمون‌های من-کندال اصلاح‌شده و همچنین شیب سن با استفاده از داده سری زمانی ۳۶ پیرومتر بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۹ پرداخته شده است. همچنین برای بررسی وجود نقطه شکست در سری زمانی عمق آبخوان از آزمون پتیت استفاده شده است. علاوه بر این شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی برای ۳۶ چاه محاسبه شد. برای بررسی همبستگی بین خشکسالی آب زیرزمینی و خشکسالی هواشناسی از شاخص خشکسالی پالمر استفاده شد. همچنین برای بررسی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه، بررسی شد.

### محدوده مطالعاتی

آبخوان مشهد-چناران در محدوده‌ی طول جغرافیایی  $35^{\circ}58'$  تا  $58^{\circ}29'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $37^{\circ}3'$  شمالی قرار دارد و با مساحتی در حدود ۲۵۲۷ کیلومتر مربع به عنوان بزرگ‌ترین و اصلی‌ترین آبخوان آبرفتی در استان خراسان رضوی شناخته می‌شود. این آبخوان که در بخش شمالی استان و در حوضه‌ی کشفورد قرار گرفته، از جهت‌های مختلف به موانع طبیعی محدود می‌گردد؛ به طوری که از جنوب به کوه‌های بینالود، از شمال به کوه‌های هزار مسجد، از جنوب شرقی به حوضه‌ی رودخانه جامرود و از شمال غربی به حوضه‌ی رودخانه اترک متصل است و شهر مشهد با مساحتی حدود ۳۵۱ کیلومتر مربع را به عنوان اصلی‌ترین شهر این محدوده در بر می‌گیرد (Prohibition Report of the Mashhad-Chenaran Study Area, 2018). آب زیرزمینی تأمین‌کننده‌ی بیش از ۸۰ درصد منابع آبی خراسان رضوی است (Mirboluki et al., 2024).

میانگین ارتفاع این منطقه مطالعاتی حدود ۱۱۳۵ متر از سطح دریا و بین حدود ۸۵۶ تا ۱۳۹۹ متر از سطح دریا متغیر است. این منطقه دارای اقلیمی سرد و نیمه‌خشک است. میانگین بارش سالانه در منطقه مورد مطالعه حدود ۲۱۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (Prohibition Report of the Mashhad-Chenaran Study Area, 2018).

بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی، تحقیقات ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی، آبخوان مشهد-چناران یک آبخوان آزاد بوده و توپوگرافی سنگ بستر آن به شدت

آب‌زیرزمینی بیشتر تحت تأثیر عوامل انسانی است (Nourmohamadi et al, 2017).

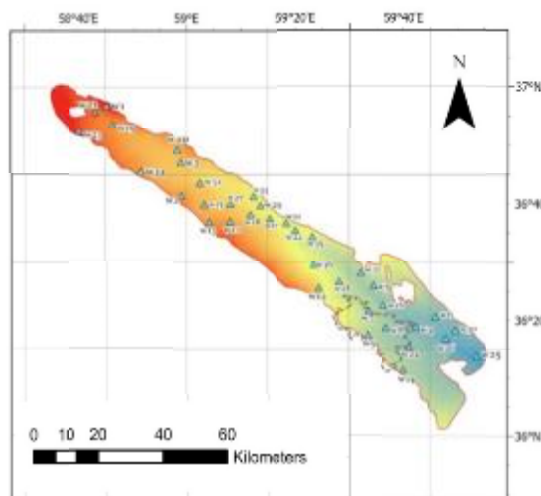
بررسی علل تغییرات کمی آبخوان از دیگر موضوعات قابل توجه در پژوهش‌ها است. برای نمونه، Siddik et al., (2022) تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر تغذیه آب زیرزمینی را در مناطق شمالی بنگلادش بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه افزایش مناطق شهری را موجب کاهش تغذیه آب‌زیرزمینی دانسته‌اند. (Liu et al., 2024) به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله بارندگی، دما، شاخص خشکسالی پالمر (PDSI)<sup>۱</sup> و توپوگرافی بر عمق آب زیرزمینی با روش‌های آماری در منطقه‌ای در چین که برداشت از آب زیرزمینی ناچیز است پرداخته‌اند. مطالعات دیگری نیز به بررسی تغییرات توأم بارندگی و سطح آب زیرزمینی پرداخته‌اند (Prajapati et al., 2021, Sahoo et al., 2021, Roy et al., 2023). در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه انجام شده است. (Ashraf et al., 2021) به بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله خشکسالی هواشناسی و انسانی بر تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در تمامی آبخوان‌های ایران بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اگرچه خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌عنوان محرک عمل کرده و باعث تشدید نرخ کاهش ذخایر آب زیرزمینی در سطح کشور شده‌اند، اما کاهش آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌های آبریز عمدتاً ناشی از برداشت‌های گسترده انسانی از منابع آب بوده است (Ashraf et al., 2021). حیدری‌زاده و همکاران در پژوهش خود به بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، بارندگی و تغییرات کاربری اراضی در دشت مهران پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از نقشه‌های هم‌افت، میزان افت سطح آب را تحلیل کرده و همچنین با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، افزایش کاربری‌های کشاورزی و مسکونی را بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که تغییرات کاربری اراضی تأثیر قابل‌توجهی بر افت سطح آب زیرزمینی داشته است (Heidarizadeh et al., 2019). با این حال، این پژوهش به بررسی جزئی تغییرات در هر پیرومتر و یا تحلیل دقیق‌تر انواع کاربری‌های مؤثر بر افت سطح آب نپرداخته است.

در این مطالعه به بررسی تغییرات عمق آبخوان در محدوده مطالعاتی آبخوان مشهد-چناران و روند این تغییرات با

در حدود ۷۰ سانتی‌متر و در مجموع حدود ۲۲ متر افت داشته است. بر اساس آخرین داده‌های بررسی ملی در منطقه آبخوان مشهد-چناران، ۱۲۲۱ حلقه چاه، ۱۰۱ رشته قنات و ۲ دهنه چشمه در این منطقه شناسایی شده است (Arjmand Sharif and Jafari, 2022). شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی را در سطح کشور، استان، دشت مشهد و موقعیت ۳۶ پیزومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و پیزومترها



### داده مورد استفاده

برای بررسی عمق آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی، داده‌های ۸۳ پیزومتر با اندازه‌گیری‌های ماهانه عمق آب از سال ۱۳۴۳ تا ۱۳۹۹ از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه شد. وجود تاریخ متفاوت آغاز برداشت و همچنین وجود درصد بالای داده مفقود از مشکلات این داده‌ها بود. برای رفع این مشکل، تنها چاه‌هایی که کمتر از ۱۰ درصد داده‌های مفقود شده بین سال‌های ۱۳۶۷ (۱۹۸۹) تا ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) داشتند، انتخاب شدند. بر این اساس ۳۶ پیزومتر برای بررسی روند انتخاب شدند که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اصلاح درصد کم داده‌های مفقود در پیزومترهای انتخابی، از رگرسیون خطی چندگانه در نرم‌افزار SPSS 26 استفاده شد.

برای بررسی تغییرات کاربری اراضی از محصول کاربری اراضی GLAD<sup>۱</sup> که به بررسی تغییرات جهانی کاربری

اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سری لندست از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ می‌پردازد، استفاده شد. دلیل انتخاب این محصول وضوح ۳۰ متری و دقت کلی بالای آن در کلاس‌های مختلف است (Potapov et al., 2022). دلیل عدم همپوشانی کامل بین بازه‌های زمانی داده‌های پیزومترها و نقشه‌های کاربری اراضی، محدودیت در دسترسی به داده‌های با کیفیت کاربری اراضی قبل از سال ۲۰۰۰ است. در این مطالعه، از داده‌های کاربری اراضی محصول GLAD استفاده شده است که پوشش زمانی آن از سال ۲۰۰۰ آغاز می‌شود.

شاخص خشکسالی پالمِر (PDSI) از محصول جهانی TerraClimate با وضوح مکانی ۱/۲۴° (حدوداً ۴۶۳۸ متر) و دوره زمانی ماهانه (Abatzoglou et al., 2018) در بازه مورد مطالعه دریافت شد. برای مقایسه دقیق، تمامی تاریخ‌ها به هجری شمسی تبدیل شدند.

1- Global Land Cover and Land Use

## مواد و روش‌ها

## بررسی روند تغییرات عمق آب زیرزمینی

آزمون‌های روند به منظور شناسایی وجود روند و معنی‌داری آماری آن در داده‌ها اعمال می‌شوند. آزمون من-کندال که توسط من و کندال پیشنهاد شد، یک آزمون ناپارامتری مهم است که برای داده‌های با توزیع غیرنرمال نیز مناسب است (Monir et al., 2023, Kendall, 1948, Mann, 1945). این آزمون، نبود خودهمبستگی در داده‌ها است. وجود همبستگی سری زمانی در داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی می‌تواند منجر به افزایش احتمال شناسایی نادرست روند شود (Wang et al., 2020). برای مقابله با مشکل خود همبستگی سری زمانی در مجموعه داده‌ها، چندین اصلاحیه پیشنهاد شده است. در این مطالعه، از آزمون من-کندال اصلاح‌شده که توسط حامد و رائو توسعه یافته (Hamed and Ramachandra Rao, 1998)، استفاده شده است. علاوه بر این، برای برآورد شیب روند، از شیب سن (Sen, 1968) استفاده شد.

روش من-کندال (MK) آماره S را محاسبه می‌کند که یک تحلیل رگرسیون ناپارامتری است و بر مبنای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده بعدی با قبلی است. در آزمون من کندال آماره S با معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

که در اینجا n نشان‌دهنده تعداد نقاط داده و  $x_i$  و  $x_j$  به ترتیب نشان‌دهنده داده‌ها در سری زمانی i و j هستند، که در آن  $j > i$  است. هر داده مشاهداتی  $x_i$  به عنوان نقطه مرجع استفاده شده و بقیه داده‌ها  $x_j$  به صورت معادله (۲) با آن مقایسه می‌شوند:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} = +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ = 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ = -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

اگر مقدار S مثبت باشد، نشان‌دهنده روند افزایشی است؛ در حالی که مقادیر منفی آن نشان‌دهنده گرایش نزولی در طول زمان است.

واریانس S را زمانی که  $n > 8$  باشد، می‌توان از معادله (۳) محاسبه کرد (Patle et al., 2015):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (3)$$

که در اینجا t تعداد تکرارهای یک مقدار خاص در داده‌هاست. آماره آزمون استاندارد شده Z نیز به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در من-کندال اصلاح‌شده واریانس S طبق معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S)^* = \text{Var}(S) \times \frac{n}{n^*} \quad (5)$$

که در اینجا  $\frac{n}{n^*}$  ضریب اصلاحی مرتبه k<sup>ام</sup> برای داده‌های دارای خودهمبستگی است که از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)r_k \quad (6)$$

و مقدار  $r_k$  مطابق با معادله (۷) است.

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \times \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

در اینجا  $x_i$  مقدار سری زمانی در زمان i و  $\bar{x}$  میانگین سری زمانی است. k مقدار تأخیر است که برای محاسبه خود همبستگی استفاده می‌شود (Hamed and Ramachandra Rao, 1998).

شیب سن که معمولاً به همراه آزمون من-کندال به کار می‌رود، برای محاسبه بزرگی روند استفاده می‌شود. شیب سن به عنوان میانه شیب‌هایی که از تمام جفت داده‌های موجود در سری زمانی محاسبه شده‌اند، تعریف می‌شود (معادله ۸).

$$Q = \text{median} \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (8)$$

در تکنیک شیب سن (Sen's Slope)، برای محاسبه شیب بین جفت‌های داده، شرایط زیر برقرار است:  
 $i < j$  و  $j$  از ۱ تا n و  $i$  از ۱ تا n-1 تغییر می‌کند. n تعداد کل مشاهدات در سری زمانی است (Sen, 1968).

## آزمون ناپارامتری نقطه شکست (آزمون پتیت)

آزمون پتیت نسخه‌ای اصلاح‌شده از آزمون رتبه‌بندی من-وینتی است که زمان وقوع تغییر در یک سری زمانی را شناسایی می‌کند. فرضیه صفر این آزمون بیان می‌کند که هیچ تغییری در سری زمانی وجود ندارد، در حالی که

فرضیه جایگزین نشان‌دهنده یک تغییر در میانگین است. این آزمون به تغییرات در میانگین حساس است و در صورت رد فرضیه  $H_0$  (همگنی سری)، یک برآورد از تاریخ نقطه شکست ارائه می‌دهد. اگر شکست در روند در زمان  $K$  رخ دهد، مقدار مطلق آماره پتیت ( $K_t$ ) برای آن زمان حداکثر خواهد بود و نقطه تغییر احتمالی در جایی قرار دارد که آماره پتیت به حداکثر مقدار خود می‌رسد (Pettitt, 1980). آماره پتیت به صورت معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$K_t = \max |U_{t,T}| \quad (9)$$

که در اینجا  $U_{t,T}$  از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sign}(x_i - x_j) \quad (10)$$

که مقدار  $\text{sign}(x_i - x_j)$  به صورت معادله (۱۱) است.

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{if } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{if } x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (11)$$

#### شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی (SGI)

شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی (SGI) مشابه شاخص استاندارد بارش (SPI) است. این شاخص یک روش کمی برای ارزیابی کمبود سطح آب زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی مختلف است. بر اساس مقادیر SGI، می‌توان تعداد سال‌های خشکسالی که نشان‌دهنده کمبود آب زیرزمینی است و همچنین تغییرات زمانی آن را مشاهده کرد (Halder et al., 2020). این شاخص یکی از شاخص‌های ارائه شده برای خشکسالی آب زیرزمینی است (Bloomfield and Marchant, 2013a). در سال‌های اخیر از این شاخص در مطالعات متعددی استفاده شده است (Mukhawana et al., 2024, Halder et al., 2020, Kumari et al., 2023, Dubois and Larocque, 2024). برای محاسبه این شاخص به داده‌ی سری زمانی سطح آب زیرزمینی نیاز می‌باشد که در این پژوهش از داده‌های ماهانه برای محاسبه این شاخص استفاده شده است.

محاسبه SGI از جهاتی مشابه محاسبه شاخص استاندارد بارش (SPI) است. با این حال بر خلاف بارندگی، سطح آب زیرزمینی نیازی به تجمعی کردن آن در یک زمان مشخص نیست. برای محاسبه ابتدا مشاهدات آب زیرزمینی جمع‌آوری شده و سپس مقیاس زمانی محاسبه شاخص انتخاب می‌شود. برای محاسبه این شاخص دو راه وجود دارد. در یک روش سری زمانی سطح آب زیرزمینی به یک تابع توزیع احتمالاتی (PDF) مانند توزیع نرمال، لوگ-نرمال یا گاما برازش داده می‌شود (Mukhawana et al., 2024). یکی از محدودیت‌های این روش این است که تابع توزیع با بهترین برازش در مورد هر چاه می‌تواند متفاوت باشد. یک روش جایگزین برای برازش توزیع‌های استاندارد، استفاده از تبدیل نمرات نرمال (Mcbratney, 2004) است. تبدیل نمرات نرمال (NST) به گونه‌ای طراحی شده است که مجموعه داده را به شکلی تبدیل کند که شباهت نزدیکی به یک توزیع نرمال استاندارد داشته باشد. این تبدیل با مرتب‌سازی مقادیر موجود در مجموعه داده از کمترین به بیشترین مقدار و رتبه‌دهی به داده‌ها از ۱ تا  $n$  انجام می‌شود و به هر رتبه یک احتمال تجمعی تجربی ( $p_i$ ) اختصاص داده می‌شود. تبدیل نمرات نرمال با اعمال تابع توزیع تجمعی معکوس نرمال بر مقادیر  $p_i$  که به صورت مساوی در بازه  $\frac{1}{2n}$  تا  $1 - \frac{1}{2n}$  تقسیم شده‌اند، انجام می‌شود. مقادیری که از این تبدیل به دست می‌آیند، به عنوان مقادیر SGI شناخته می‌شوند. سپس این مقادیر به ترتیبی بازچینش می‌شوند که بزرگ‌ترین مقدار SGI به بزرگ‌ترین  $p_i$  اختصاص داده شود، دومین مقدار بزرگ به دومین  $p_i$  و به همین ترتیب ادامه یابد (Bloomfield and Marchant, 2013b). مقادیر نهایی به صورت بزرگتر از صفر که نشان‌دهنده عدم وجود خشکسالی و کوچکتر از صفر که نشان از خشکسالی است تقسیم‌بندی می‌شوند (Mukhawana et al., 2024). تقسیم‌بندی مقادیر خشکسالی نیز به صورت جدول ۱ است.

جدول ۱- تقسیم‌بندی شاخص استاندارد آب زیرزمینی

| شاخص SGI |                   |              |               |              |              |
|----------|-------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| خشکسالی  | $\leq -2$         | -۱/۵-۱/۹۹    | -۱-۱/۴۹       | ۰۰۰/۹۹       | ۰            |
|          | خشکسالی خیلی شدید | خشکسالی شدید | خشکسالی متوسط | خشکسالی خفیف | بدون خشکسالی |
| ترسالی   | $\geq 2$          | ۱/۵-۱/۹۹     | ۱-۱/۴۹        | ۰۰۰/۹۹       | ۰            |
|          | ترسالی خیلی شدید  | ترسالی شدید  | ترسالی متوسط  | ترسالی خفیف  | بدون خشکسالی |

## نتایج و بحث

آباد ویرانی با بیش از ۱۶۰ متر مشاهده شد؛ در حالی که کمترین عمق در پیزومتر کبیر با کمتر از ۱۰ متر به ثبت رسیده است. شماره، حداکثر، حداقل و میانگین عمق در بازه مطالعاتی و همچنین مختصات و تراز هر پیزومتر در جدول ۲ نشان داده شده است.

در این مطالعه از داده‌های مشاهده‌ای ۳۶ پیزومتر در محدوده آبخوان مشهد-چناران بین سال‌های ۱۳۶۷ (۱۹۸۹) تا ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) استفاده شد. بیشترین عمق آب‌زیرزمینی در جنوب شرقی آبخوان و در پیزومتر حسن

جدول ۲- مشخصات پیزومترها و عمق آب مشاهده‌شده در هر پیزومتر

| شماره چاه | نام چاه         | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | میانگین عمق | حداقل عمق | حداکثر عمق | تراز چاه |
|-----------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-----------|------------|----------|
| ۱         | آقارچی          | ۶۵۶۱۷۰        | ۴۰۹۰۴۹۷       | ۴۹/۱        | ۴۶/۴      | ۵۵/۱۶      | ۱۳۳۷/۰۷  |
| ۲         | اخلمد           | ۶۷۷۲۷۸        | ۴۰۶۲۳۳۹       | ۶۱/۷        | ۵۰/۹      | ۷۵         | ۱۲۱۹/۰۷  |
| ۳         | افصل آباد       | ۶۷۶۸۶۴        | ۴۰۷۲۸۱۸       | ۴۷/۴        | ۲۷/۳      | ۶۵/۰۳      | ۱۱۷۱/۳۹  |
| ۴         | التیمور         | ۷۴۲۹۹۸        | ۴۰۲۲۱۹۶       | ۱۲/۸        | ۱۰/۱۵     | ۱۵/۱۷      | ۹۲۳/۲۳   |
| ۵         | امرقان فردوسی   | ۷۳۰۸۷۸        | ۴۰۳۵۰۲۴       | ۸۳/۸        | ۵۳/۴۵     | ۱۰۰/۷      | ۹۹۲/۷۶   |
| ۶         | امرقان هلا لی   | ۷۴۸۳۸۹        | ۴۰۲۵۴۵۹       | ۸۹/۵        | ۵۴/۹      | ۱۰۱/۶      | ۹۳۳/۷۴   |
| ۷         | بحرآباد         | ۷۲۹۷۴۷        | ۴۰۲۶۹۱۶       | ۶۰          | ۴۲/۴۷     | ۶۸/۸       | ۱۰۰۷/۰۵  |
| ۸         | بلوار راه آهن   | ۷۳۴۷۳۵        | ۴۰۲۱۶۴۱       | ۳۱/۵        | ۲۲/۹      | ۳۹/۶       | ۹۷۹/۶    |
| ۹         | بلوار تلویزیون  | ۷۲۹۷۶۲        | ۴۰۱۹۱۸۳       | ۵۰/۵        | ۴۵/۸      | ۵۶/۹       | ۱۰۱۷/۶۳  |
| ۱۰        | جمع آب          | ۶۹۰۸۷۰        | ۴۰۵۴۳۶۷       | ۷۸/۷        | ۵۰/۵      | ۹۷/۷       | ۱۲۰۳/۷۳  |
| ۱۱        | جوی پائین       | ۷۰۶۴۶۳        | ۴۰۵۴۲۹۶       | ۱۹/۵        | ۱۱/۶      | ۲۴/۸       | ۱۰۷۵/۵   |
| ۱۲        | حسن آباد ویرانی | ۷۱۵۸۶۹        | ۴۰۳۳۷۴۷       | ۱۳۹/۸       | ۱۱۷/۵     | ۱۶۶/۴      | ۱۱۳۷/۲۳  |
| ۱۳        | خرم آباد        | ۶۸۵۱۸۸        | ۴۰۵۴۰۷۹       | ۳۹          | ۲۰/۸      | ۴۸/۵       | ۱۲۱۵/۵۱  |
| ۱۴        | خواجه اباصلت    | ۷۳۹۸۶۷        | ۴۰۰۸۴۹۷       | ۱۰۱/۱       | ۸۸        | ۱۱۱/۹      | ۹۹۷/۶۹   |
| ۱۵        | خیرآباد         | ۶۸۳۶۷۴        | ۴۰۵۹۵۸۸       | ۴۱/۳        | ۲۴/۶      | ۵۳         | ۱۱۷۸/۱۳  |
| ۱۶        | خین عرب         | ۷۳۳۶۵۸        | ۴۰۲۸۱۷۴       | ۲۹/۲        | ۲۰/۷      | ۳۴/۰۴      | ۹۵۹/۲۴   |
| ۱۷        | درنگون          | ۷۰۱۸۴۷        | ۴۰۵۵۵۵۳       | ۶/۳         | ۱/۵       | ۱۲/۶       | ۱۰۸۹/۸۶  |
| ۱۸        | ذهاب ۱          | ۶۹۶۴۳۳        | ۴۰۵۶۵۹۲       | ۲۲/۷        | ۱۶/۶      | ۳۴/۴۴      | ۱۱۴۹/۵۱  |
| ۱۹        | رضاآباد شرقی    | ۶۵۷۸۱۱        | ۴۰۸۴۴۶۵       | ۶۳/۶        | ۴۹/۹۸     | ۷۵/۹۳      | ۱۲۲۸/۸۳  |
| ۲۰        | ریاض            | ۶۷۵۸۳۸        | ۴۰۷۶۷۷۶       | ۵۸/۸        | ۴۴/۵۴     | ۷۲/۹۱      | ۱۱۸۵/۸۸  |
| ۲۱        | شورچه           | ۶۵۳۰۶۹        | ۴۰۸۸۴۳۶       | ۱۵/۳        | ۱۱/۹      | ۱۷/۸۳      | ۱۲۶۴/۹۵  |
| ۲۲        | قره جنگل        | ۷۰۹۰۷۸        | ۴۰۵۲۰۲۵       | ۳۷          | ۱۷/۶۷     | ۶۲/۲۱      | ۱۰۷۰/۳   |
| ۲۳        | قره چاه         | ۶۴۸۷۰۱        | ۴۰۸۲۲۹۸       | ۴۰          | ۳۸/۱۱     | ۴۳/۹۲      | ۱۳۱۱/۴۱  |
| ۲۴        | قلعه ساختمان    | ۷۴۱۳۶۷        | ۴۰۱۵۷۰۴       | ۷۱/۵        | ۵۹/۱۴     | ۷۸/۸۵      | ۹۶۰/۱۲   |
| ۲۵        | قوزقان          | ۷۶۰۱۵۷        | ۴۰۱۳۴۶۷       | ۱۸/۷        | ۱۱/۱۵     | ۲۴/۷۹      | ۸۷۳/۶۲   |
| ۲۶        | قیاس آباد ۲     | ۷۵۱۴۶۰        | ۴۰۱۸۶۴۲       | ۱۴/۴        | ۸/۳       | ۲۰/۳۵      | ۸۹۶/۰۴   |
| ۲۷        | کبیر            | ۶۹۰۸۸۰        | ۴۰۵۹۹۸۲       | ۹/۲         | ۳         | ۱۶/۱۱      | ۱۱۴۶/۳۵  |
| ۲۸        | کلا ته برفی     | ۷۲۱۳۷۰        | ۴۰۳۵۹۵۶       | ۸۰/۵        | ۶۱/۲۵     | ۹۹/۲۸      | ۱۰۴۲/۴۷  |
| ۲۹        | کلا ته نادر     | ۶۹۹۱۳۸        | ۴۰۵۹۶۴۴       | ۱۱/۴        | ۵/۶۲      | ۱۸/۹۱      | ۱۱۰۴/۸   |
| ۳۰        | کنه بیست        | ۷۵۳۹۹۸        | ۴۰۲۱۴۶۱       | ۵۸          | ۴۷/۸۱     | ۶۳/۰۹      | ۹۲۲/۳۹   |
| ۳۱        | مسکران          | ۷۲۷۲۷۲        | ۴۰۳۸۹۳۰       | ۳۳/۲        | ۲۹/۶      | ۳۶/۳۲      | ۱۰۰۱/۰۲  |
| ۳۲        | ملی             | ۶۸۲۳۲۴        | ۴۰۶۶۳۸۱       | ۱۹          | ۹/۶۸      | ۳۱/۸۷      | ۱۱۵۶/۹۲  |
| ۳۳        | نومهن           | ۶۹۷۱۷۴        | ۴۰۶۲۴۶۲       | ۸/۹         | ۵/۷۲      | ۲۲/۰۹      | ۱۱۰۹/۹   |
| ۳۴        | یکه لنگه        | ۶۶۵۸۰۰        | ۴۰۶۹۸۰۰       | ۹۱/۶        | ۷۰/۲۵     | ۱۱۳/۳۶     | ۱۲۱۸/۹۸  |
| ۳۵        | شیرحصار         | ۷۱۳۷۲۲        | ۴۰۵۰۱۳۶       | ۵۰/۷        | ۳۶/۴۷     | ۶۵/۷۲      | ۱۰۶۹/۶۹  |
| ۳۶        | عسکریه          | ۷۱۴۳۳۸        | ۴۰۴۱۲۰۴       | ۷۵/۳        | ۵۰/۵۸     | ۹۷/۸۳      | ۱۰۷۷/۶۷  |

### روند عمق آب زیرزمینی

روند سالانه هر پیزومتر با استفاده از روش‌های من-کندال اصلاح‌شده بررسی شد. براساس نتایج آزمون من-کندال اصلاح‌شده از مجموع ۳۶ پیزومتر، عمق آب در ۲۵ پیزومتر روند افزایشی، در یک پیزومتر روند کاهشی و در ۱۰ پیزومتر بدون روند بود. سطح معنی‌داری در نظر گرفته شده ۵ درصد است. همچنین محاسبه شیب سن نشان می‌دهد، بیشترین شیب تغییرات در پیزومترهای قره جنگل (پیزومتر ۲۲) و عسکریه (پیزومتر ۳۶) با حدود ۱/۵ متر افزایش عمق سالانه است. از ۳۶ پیزومتر، ۳۰ پیزومتر شیب مثبت عمق داشته‌اند که از این تعداد ۹ پیزومتر شیبی بالای یک متر افزایش عمق سالیانه، ۶ پیزومتر شیب بین ۰/۵ تا یک متر و ۱۵ پیزومتر شیبی کمتر از ۰/۵ متر در سال افزایش عمق داشته‌اند. شیب تغییرات عمق در ۶ پیزومتر منفی بود که بیشترین شیب کاهش عمق در پیزومتر قیاس‌آباد ۲ با حدود ۰/۳ متر کاهش عمق در سال دیده شده است. مقادیر آماره Z و شیب سن سالانه و همچنین روند و شیب فصلی و نقطه شکست در جدول ۳ قابل مشاهده است.

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، روند فصلی آب‌زیرزمینی در چاه‌ها با روند سالانه آن‌ها مطابق است. همچنین، روند تغییرات شیب در تمامی فصل‌ها تقریباً برابر است و اختلاف شیب فصلی بسیار جزئی است. برای

بررسی دقیق‌تر تغییرات مکانی آب‌زیرزمینی روند و شیب سن سالانه در محدوده مطالعاتی در هر پیزومتر در شکل ۲ آمده است. از جدول ۳ می‌توان دریافت که پیزومترهایی که بدون روند معنی‌دار بوده‌اند، دارای نقطه شکستی متفاوت هستند. این موضوع به خصوص در پیزومترهایی که در شهر مشهد و در نزدیکی آن قرار دارند دیده می‌شود.

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، پیزومترهای شهر مشهد دارای روند نبوده و عمدتاً دارای شیب منفی (کاهش عمق) هستند. طبق گزارش به‌هنگام‌سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوضه قره‌قوم، دلیل کاهش عمق و بالا آمدگی سطح آب در پیزومترهای شهر مشهد افزایش‌یافتن حجم آب برگشتی بوده که در نتیجه انتقال از خارج این محدوده به شهر مشهد است (Report on the Updated Water Balance of the Qaraqum Basin, 2016). برای بررسی بیشتر، افت سطح آب در دوره مطالعاتی در پیزومترها بررسی شد. در حالی که در پیزومترهای آقارچی (۰/۵ متر)، بلوار تلویزیون (۵ متر)، قوزقان (۴ متر)، قیاس‌آباد ۲ (۷/۵ متر) و مسکران (۱/۱ متر) در طول ۳۲ سال شاهد کاهش عمق و بالاآمدگی سطح آب بوده‌ایم، بیشترین افت در پیزومتر عسکریه (بیش از ۴۳ متر) رخ داده است.

جدول ۳- روند و شیب سن سالانه و فصلی در هر پیزومتر

| شماره چاه | نام چاه        | سال شروع نقطه تغییر (نقطه شکست) | روند سالانه      |         | بهار  | تابستان | پاییز  | زمستان |
|-----------|----------------|---------------------------------|------------------|---------|-------|---------|--------|--------|
|           |                |                                 | آماره Z (سالانه) | روند    | شیب   | شیب     | شیب    | شیب    |
| ۱         | آقارچی         | ۱۳۷۳                            | ۰/۰۷             | -       | ۰     | ۰/۰۰۱   | ۰      | ۰/۰۰۱  |
| ۲         | اخلمد          | ۱۳۷۶                            | -۱/۴             | -       | -۰/۲۴ | -۰/۰۸۳  | -۰/۰۸۹ | -۰/۰۸۶ |
| ۳         | افصل آباد      | ۱۳۸۲                            | ۵                | افزایشی | ۱/۲۴  | ۰/۴۱*   | ۰/۴*   | ۰/۴۱*  |
| ۴         | التیمور        | ۱۳۷۸                            | ۰/۲۴             | -       | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۸   | ۰/۰۰۴  | ۰/۰۰۴  |
| ۵         | امرقان فردوسی  | ۱۳۸۲                            | ۴/۸              | افزایشی | ۱/۳۴  | ۰/۴۷*   | ۰/۴۴*  | ۰/۴۲*  |
| ۶         | امرقان هلا لی  | ۱۳۸۲                            | ۳/۶۹             | افزایشی | ۱/۰۵  | ۰/۳۶*   | ۰/۳۸*  | ۰/۳۲*  |
| ۷         | بحرآباد        | ۱۳۷۹                            | ۱/۹۳             | -       | ۰/۳۲  | ۰/۱۳۱   | ۰/۱    | ۰/۱۲   |
| ۸         | بلوار راه آهن  | ۱۳۷۳                            | -۰/۸۴            | -       | -۰/۱۳ | -۰/۰۴   | -۰/۰۶  | -۰/۰۴  |
| ۹         | بلوار تلویزیون | ۱۳۷۲                            | -۰/۹۷            | -       | -۰/۰۷ | -۰/۰۳   | -۰/۰۳  | -۰/۰۲  |
| ۱۰        | جمع آب         | ۱۳۸۳                            | ۳/۸۵             | افزایشی | ۱/۴۵  | ۰/۴۸*   | ۰/۴۹*  | ۰/۵*   |
| ۱۱        | جوی پائین      | ۱۳۷۹                            | ۴/۰۳             | افزایشی | ۰/۳۳  | ۰/۱۱*   | ۰/۱۱*  | ۰/۱*   |
| ۱۲        | حسن آبادویرانی | ۱۳۸۰                            | ۴/۵۹             | افزایشی | ۱/۳۱  | ۰/۴۳*   | ۰/۴۵*  | ۰/۴۳*  |

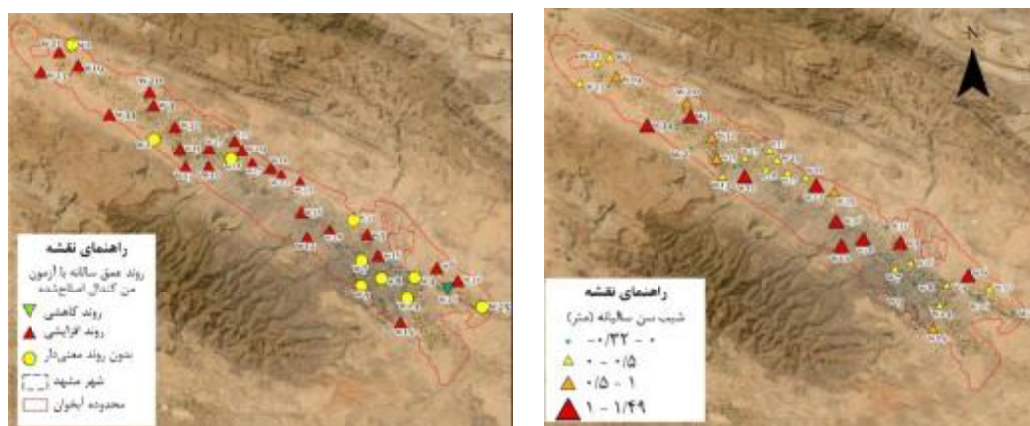
ادامه جدول ۴-

| شماره چاه | نام چاه         | سال شروع نقطه<br>تغییر (نقطه شکست) | آماره z (سالانه) | روند سالانه | بهار  | تابستان | پاییز  | زمستان |
|-----------|-----------------|------------------------------------|------------------|-------------|-------|---------|--------|--------|
|           |                 |                                    |                  | شیب         | شیب   | شیب     | شیب    | شیب    |
| ۱         | آقارچی          | ۱۳۷۳                               | -۰/۰۷            | -           | -۰/۰۱ | ۰       | ۰      | -۰/۰۱  |
| ۲         | اخلمد           | ۱۳۷۶                               | -۱/۴             | -           | -۰/۲۴ | -۰/۰۸۳  | -۰/۰۸۹ | -۰/۰۸۶ |
| ۳         | افصل آباد       | ۱۳۸۲                               | ۵                | افزایشی     | ۱/۲۴  | -۰/۴۱*  | -۰/۴*  | -۰/۴۱* |
| ۴         | التیمور         | ۱۳۷۸                               | -۰/۲۴            | -           | -۰/۰۵ | -۰/۰۰۸  | -۰/۰۰۴ | -۰/۰۰۴ |
| ۵         | امرقان فردوسی   | ۱۳۸۲                               | ۴/۸              | افزایشی     | ۱/۳۴  | -۰/۴۷*  | -۰/۴۴* | -۰/۴۲* |
| ۶         | امرقان هلا لی   | ۱۳۸۲                               | ۳/۶۹             | افزایشی     | ۱/۰۵  | -۰/۳۶*  | -۰/۳۸* | -۰/۳۲* |
| ۷         | بحرآباد         | ۱۳۷۹                               | ۱/۹۳             | -           | -۰/۳۲ | -۰/۱۳۱  | -۰/۱   | -۰/۱۲  |
| ۸         | بلوار راه آهن   | ۱۳۷۳                               | -۰/۸۴            | -           | -۰/۱۳ | -۰/۰۴   | -۰/۰۶  | -۰/۰۴  |
| ۹         | بلوار تلویزیون  | ۱۳۷۲                               | -۰/۹۷            | -           | -۰/۰۷ | -۰/۰۳   | -۰/۰۳  | -۰/۰۲  |
| ۱۰        | جمع آب          | ۱۳۸۳                               | ۳/۸۵             | افزایشی     | ۱/۴۵  | -۰/۴۸*  | -۰/۴۹* | -۰/۵*  |
| ۱۱        | جوی پائین       | ۱۳۷۹                               | ۴/۰۳             | افزایشی     | -۰/۳۳ | -۰/۱۱*  | -۰/۱۱* | -۰/۱*  |
| ۱۲        | حسن آباد ویرانی | ۱۳۸۰                               | ۴/۵۹             | افزایشی     | ۱/۳۱  | -۰/۴۳*  | -۰/۴۵* | -۰/۴۳* |
| ۱۳        | خرم آباد        | ۱۳۷۹                               | ۳/۲۲             | افزایشی     | -۰/۴۶ | -۰/۱۶*  | -۰/۱۸* | -۰/۱۴* |
| ۱۴        | خواجه اباصلت    | ۱۳۷۸                               | ۳/۴۴             | افزایشی     | -۰/۵۵ | -۰/۱۸*  | -۰/۱۹* | -۰/۱۸* |
| ۱۵        | خیرآباد         | ۱۳۸۱                               | ۴/۳۱             | افزایشی     | -۰/۷۸ | -۰/۲۵۷* | -۰/۲۶* | -۰/۲۶* |
| ۱۶        | خین عرب         | ۱۳۷۷                               | ۲/۵۸             | افزایشی     | -۰/۱۱ | -۰/۰۵*  | -۰/۰۳  | -۰/۰۴* |
| ۱۷        | درنگون          | ۱۳۸۶                               | ۴/۲۹             | افزایشی     | -۰/۳۱ | -۰/۰۹*  | -۰/۱*  | -۰/۰۹* |
| ۱۸        | ذهاب ۱          | ۱۳۹۱                               | ۱/۶۲             | -           | -۰/۲۱ | -۰/۰۷   | -۰/۰۵  | -۰/۰۵* |
| ۱۹        | رضاآباد شرقی    | ۱۳۸۲                               | ۵/۰۹             | افزایشی     | -۰/۸۱ | -۰/۲۷*  | -۰/۲۷* | -۰/۲۶* |
| ۲۰        | ریاض            | ۱۳۸۵                               | ۵/۸۱             | افزایشی     | -۰/۷۸ | -۰/۲۶*  | -۰/۲۶* | -۰/۲۵* |
| ۲۱        | شورچه           | ۱۳۸۵                               | ۴/۴۶             | افزایشی     | -۰/۱۴ | -۰/۰۵*  | -۰/۰۴* | -۰/۰۴* |
| ۲۲        | قره جنگل        | ۱۳۸۴                               | ۴/۸              | افزایشی     | ۱/۴۹  | -۰/۵*   | -۰/۵۱* | -۰/۴۸* |
| ۲۳        | قره چاه         | ۱۳۸۳                               | ۴/۸۷             | افزایشی     | -۰/۱۱ | -۰/۰۳*  | -۰/۰۳* | -۰/۰۳  |
| ۲۴        | قلعه ساختمان    | ۱۳۹۰                               | -۰/۰۲            | -           | -۰/۰۱ | -۰/۰۱   | -۰/۰۰۹ | -۰/۰۱  |
| ۲۵        | قوزقان          | ۱۳۹۰                               | -۰/۵۴            | -           | -۰/۱۱ | -۰/۰۲   | -۰/۰۰۹ | -۰/۰۳  |
| ۲۶        | قیاس آباد ۲     | ۱۳۸۲                               | -۳/۸۲            | کاهشی       | -۰/۳۲ | -۰/۱*   | -۰/۱۱* | -۰/۱۱* |
| ۲۷        | کبیر            | ۱۳۸۳                               | ۳/۹              | افزایشی     | -۰/۳۳ | -۰/۱*   | -۰/۱۱* | -۰/۱*  |
| ۲۸        | کلا ته برفی     | ۱۳۸۳                               | ۵/۱۳             | افزایشی     | ۱/۱۸  | -۰/۴*   | -۰/۳۹* | -۰/۳۹* |
| ۲۹        | کلا ته نادر     | ۱۳۸۵                               | ۳/۱۲             | افزایشی     | -۰/۳۷ | -۰/۱۲*  | -۰/۱۲* | -۰/۱۲* |
| ۳۰        | کنه بیست        | ۱۳۸۱                               | ۳/۴۸             | افزایشی     | -۰/۴۲ | -۰/۱۴*  | -۰/۱۴* | -۰/۱۳* |
| ۳۱        | مسکران          | ۱۳۸۷                               | -۱/۳۲            | -           | -۰/۰۶ | -۰/۰۱   | -۰/۰۳* | -۰/۰۲  |
| ۳۲        | ملی             | ۱۳۸۰                               | ۴/۳۱             | افزایشی     | -۰/۵  | -۰/۱۷*  | -۰/۱۶* | -۰/۱۶* |
| ۳۳        | نومهن           | ۱۳۸۴                               | ۳/۰۵             | افزایشی     | -۰/۱۸ | -۰/۰۶*  | -۰/۰۵* | -۰/۰۵* |
| ۳۴        | یکه لنگه        | ۱۳۸۳                               | ۵/۱۹             | افزایشی     | ۱/۳۷  | -۰/۴۵*  | -۰/۴۶* | -۰/۴۵* |
| ۳۵        | شیرحصار         | ۱۳۸۳                               | ۴/۹۹             | افزایشی     | -۰/۹۳ | -۰/۳۱*  | -۰/۳۱* | -۰/۳۱* |
| ۳۶        | عسکریه          | ۱۳۸۳                               | ۵/۰۷             | افزایشی     | ۱/۴۹  | -۰/۵*   | -۰/۴۹* | -۰/۵*  |

\* معنی داری روند در فصل‌ها

می‌باشند. تمامی پیزومترها در سطح اطمینان ۵ درصد دارای نقطه شکست بودند.

مطابق با نقطه شکست که از جدول ۳ مشخص است، پیزومترهایی که شیب افزایش عمق بیش از یک متر را داشته‌اند، در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ دارای نقطه شکست

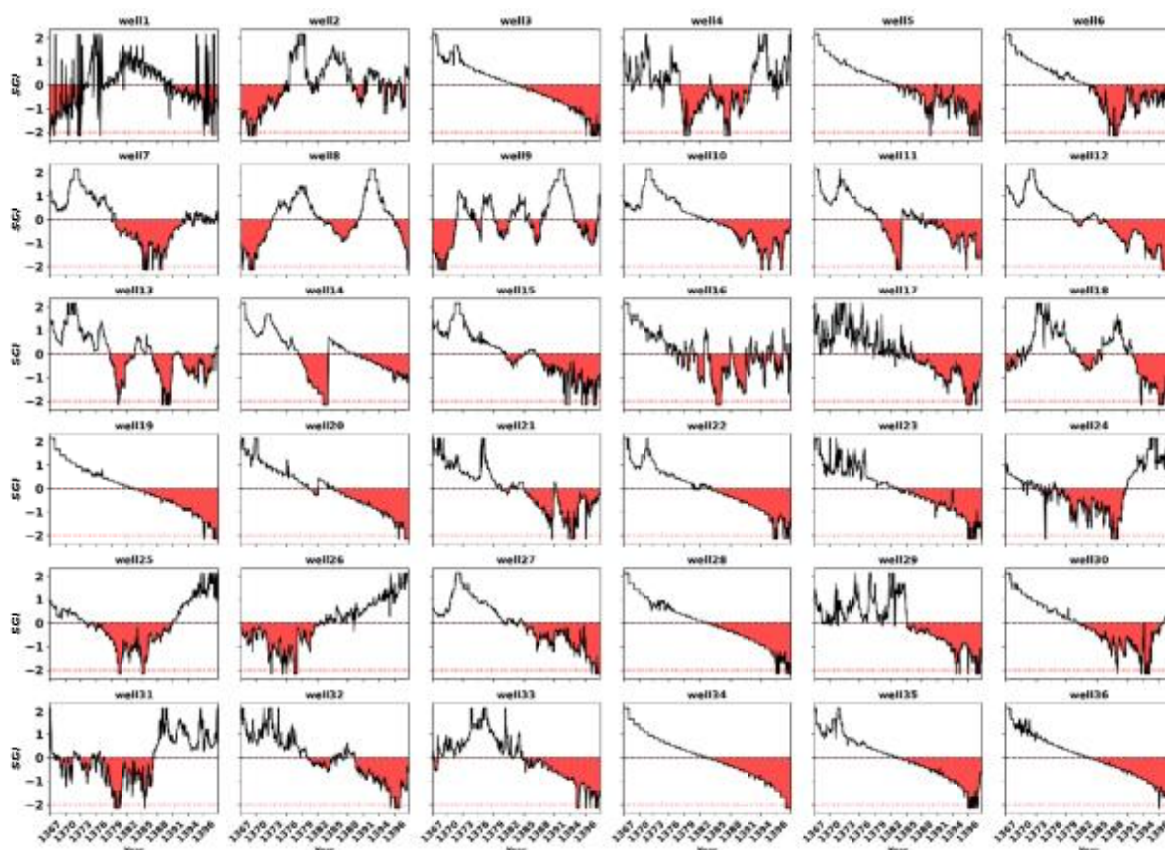


شکل ۲- روند تغییرات عمق (شکل سمت راست) در پیزومترها و شیب این تغییرات (شکل سمت چپ)

نتایج بیانگر آن است که درصد قابل توجهی از پیزومترها بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ شروع خشکسالی آب زیرزمینی را نشان می‌دهند که این خشکسالی عمدتاً تا پایان دوره ۳۲ ساله مطالعه ادامه داشته و تشدید شده است. لازم به ذکر است که نتایج به خوبی با آزمون پتیت و من-کندال مطابقت دارد. مقادیر SGI در شکل ۳ برای هر پیزومتر آمده است.

### شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی (SGI)

در این مطالعه مقادیر شاخص استاندارد آب زیرزمینی (SGI) با مقیاس زمانی ماهانه مطابق با روش پیشنهاد شده توسط بلومفیلد و همکاران (Bloomfield and Marchant, 2013b) محاسبه و مقادیر آن برای هر پیزومتر رسم شد.



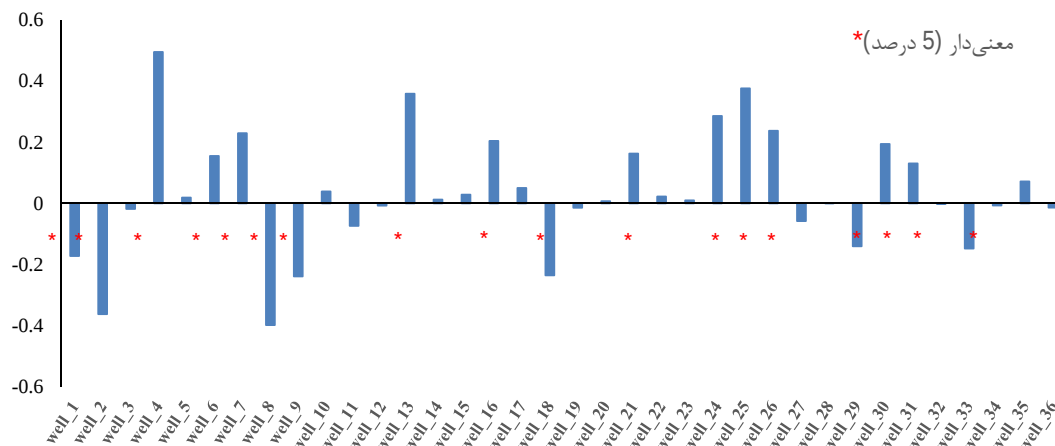
شکل ۳- شاخص استاندارد آب زیرزمینی (SGI) در بازه مطالعاتی در هر پیزومتر

مقایسه تأمین واقعی رطوبت با تأمین رطوبت متناسب با شرایط اقلیمی اندازه‌گیری می‌کند (Alley, 1985). نتایج مقایسه شاخص SGI و شاخص PDSI در شکل ۴ آمده است.

نتایج مطابق با شکل ۴ نشان می‌دهد در اکثر پیزومترها خشکسالی آب‌یرزمینی همبستگی قابل توجهی با مقادیر خشکسالی هواشناسی ندارد. این مسئله وجود عوامل انسانی را در خشکسالی آب‌یرزمینی نشان می‌دهد که با مطالعه نورمحمدی و همکاران در این محدوده تطابق دارد (Nourmohamadi et al, 2017). همبستگی منفی نیز می‌تواند به دلیل وجود عامل تغذیه باشد.

از این شاخص می‌توان به تأثیر آب‌های بازگشتی پی برد که خشکسالی در دهه آخر مطالعه در پیزومترهایی که در نواحی خروجی آبخوان و در جنوب آن قرار دارند عمدتاً وجود نداشته و یا ضعیف‌تر از سایر نقاط بوده است. برای بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر خشکسالی آب‌یرزمینی مقادیر SGI با شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) در هر پیزومتر مقایسه و همبستگی بین این پارامترها محاسبه گردید.

شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) یکی از معیارهای پرکاربرد برای اندازه‌گیری شدت خشکسالی است که مقادیری در بازه -۱۰ تا ۱۰ دارد (Ramirez et al., 2022). این شاخص خشکسالی هواشناسی را از طریق



شکل ۴- همبستگی پیرسون بین شاخص SGI و PDSI در هر پیزومتر  
(\*: سطح ۰/۰۵ معنی‌دار)

مطابق جدول ۴، کاربری کشاورزی وسعت قابل توجهی را در منطقه به خود اختصاص داده است و این وسعت در ۲۰ سال با در نظر گرفتن مساحت از دست رفته، ۱۶۷ کیلومتر مربع افزایش یافته است. کاربری شهری نیز در بیست سال دو برابر شده و وسعت مناطق شهری در این آبخوان را به ۷۴۵ کیلومتر مربع رسانیده است. نکته قابل توجه دیگر این است که از ۸ پیزومتری که شیب افزایش عمق سالانه در آنها بیشتر از یک متر است، سه پیزومتر در نواحی شهری قرار دارند. پیزومتر حسن آباد ویرانی (۱۲) در نزدیکی شهرک صنعتی واقع شده است و پیزومتر کلاته‌برفی (۲۸) در نزدیکی بخشی قرار دارد که مطابق شکل ۵ تراکم افزایش کلاس شهری در آن قابل توجه است (بلوار شاهنامه). در مجاورت پیزومتر عسکریه (۳۶)

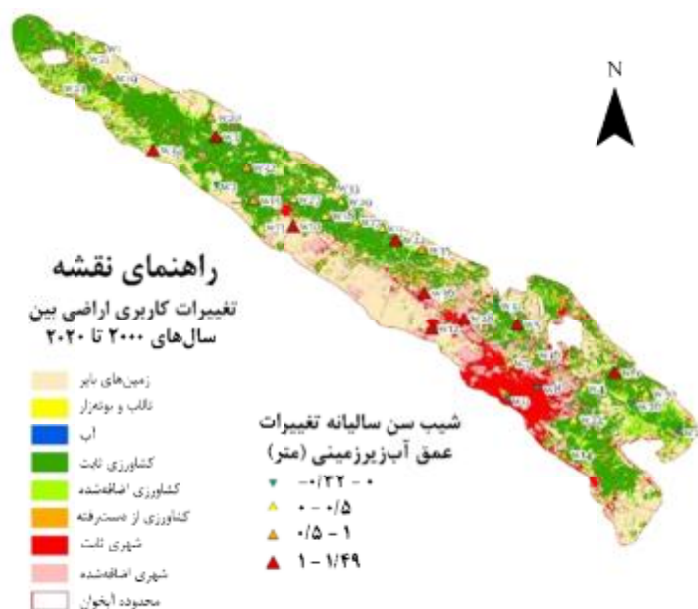
### تغییرات کاربری اراضی

برای بررسی تغییرات کاربری اراضی از محصول کاربری اراضی (GLAD (Potapov et al., 2022 استفاده و تغییرات دو کلاس شهری و کشاورزی طی ۲۰ سال از ۲۰۰۰ تا ۱۳۷۸ (۲۰۲۰ تا ۱۳۹۸) بررسی شد. نتایج در شکل ۵ آمده است.

برای مقایسه تغییرات کاربری اراضی و تغییرات عمق آب زیرزمینی، مقادیر شیب سن در هر پیزومتر نیز در شکل ۵ ارائه شده است. هر دو کاربری کشاورزی و شهری در منطقه افزایش داشته‌اند. با این حال، افزایش کاربری شهری حدوداً دو برابر افزایش کاربری کشاورزی بوده است. توضیحات مربوط به کاربری‌های کشاورزی و شهری در جدول ۴ آمده است.

شکل ۶ مساحت اراضی کشاورزی (بدون در نظر گرفتن مساحت از دست رفته در هر دوره) و شهری در بازه زمانی ۲۰ ساله، در فواصل پنج‌ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

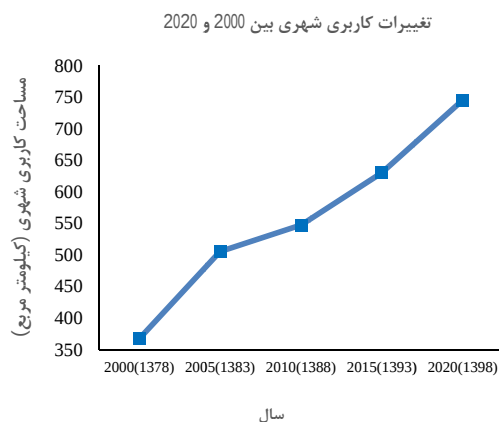
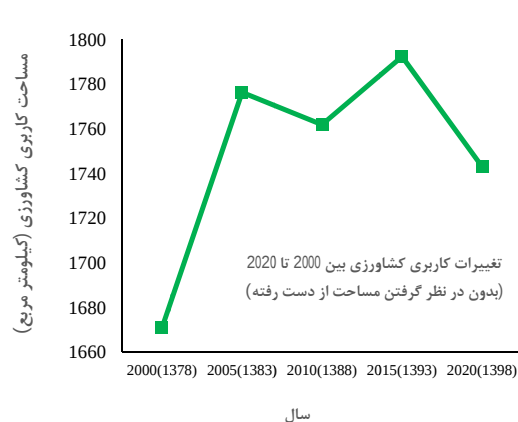
افزایش کلاس شهری و همچنین کلاس کشاورزی ثابت است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که در این منطقه در کنار کشاورزی، کلاس کاربری شهری نیز می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر افت سطح ایستایی داشته باشد. برای بررسی دقیق‌تر هر یک از کلاس‌های کاربری اراضی، در



شکل ۵- تغییرات کاربری اراضی محدوده مطالعاتی بین سال‌های ۲۰۰۰ (۱۳۷۸) تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۸)

جدول ۵- مقادیر ثابت کاربری شهری و کشاورزی و افزایش آن‌ها در محدوده مطالعاتی بر حسب کیلومتر مربع

| کشاورزی ثابت | شهری ثابت | افزایش کاربری کشاورزی (بدون در نظر گرفتن مساحت از دست رفته) | از دست رفتن کاربری کشاورزی | افزایش کاربری کشاورزی | افزایش کاربری شهری |
|--------------|-----------|-------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------|
| ۱۴۱۵/۶۴      | ۳۶۷       | ۳۲۷/۴                                                       | ۱۵۹/۷۷                     | ۱۶۷/۶۳                | ۳۷۸                |



شکل ۶- تغییرات کاربری شهری و کشاورزی بین سال‌های ۲۰۰۰ (۱۳۷۸) تا ۲۰۲۰ (۱۳۹۸) در هر دوره پنج ساله

اجرای طرح‌های پایش دوره‌ای سطح آب زیرزمینی و استفاده از فناوری‌های نوین برای مدیریت بهینه منابع آب می‌توانند از جمله پیشنهادهای مدیریتی باشند. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده تأثیر سایر عوامل انسانی نظیر برداشت از چاه‌های غیرمجاز و تغییرات کیفیت آب نیز بررسی گردد.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی به خاطر در اختیار قرار دادن داده و اطلاعات تشکر می‌نمایند.

### تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

### دسترسی به داده‌ها

بخشی از داده‌های این تحقیق از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شده است. همچنین بخشی از داده‌ها از سامانه گوگل ارث انجین به صورت تحت وب دریافت شده است.

### مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، انجام تحلیل‌های آماری، نگارش متن مقاله  
نویسنده دوم: راهنمایی، بازبینی متن مقاله

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

### منابع

1. Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A. and Hegewisch, K.C., 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, p. 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>

مطابق این شکل در حالی که کاربری شهری در تمامی سال‌ها در حال افزایش بوده، کاربری کشاورزی بین سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۳ رشد قابل توجهی داشته است. این موضوع می‌تواند از دلایل آغاز دوره خشکسالی و وجود نقطه شکست در بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ در بسیاری از پیرومترها باشد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی روند تغییرات عمق آب‌زیرزمینی در محدوده آبخوان مشهد-چناران در ۳۶ پیرومتر بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۹ پرداخته شد. نتایج نشان داد که تغییرات عمق آب زیرزمینی در اکثر پیرومترها دارای روند افزایشی بوده و تنها تعداد اندکی از پیرومترها بدون روند و یا با روند کاهشی عمق بوده‌اند که دلیل آن آب‌های برگشتی به سمت شهر مشهد است. محاسبه شاخص SGI به درک بهتر خشکسالی آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن کمک می‌کند. مقادیر شاخص SGI حاکی از شروع خشکسالی آب زیرزمینی در بسیاری از پیرومترها بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ و شدت یافتن آن است. همچنین، همبستگی ضعیف بین شاخص خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه عوامل انسانی بر وضعیت آبخوان است. برای درک بهتر تأثیر فعالیت‌های انسانی بر وضعیت آبخوان، تغییرات کاربری اراضی در دو کلاس کاربری شهری و کشاورزی بررسی شد. نتایج بیان‌گر افزایش مساحت هر دو کلاس است. تأثیر افزایش کاربری شهری در تعدادی از پیرومترها مانند عسکریه و کلاته‌برفی مشخص بوده و نشان از تأثیر این کاربری در برداشت آب دارد. کاربری کشاورزی نیز، که کاربری اصلی در محدوده بوده و مساحتی در حدود دو برابر کاربری شهری دارد، موجب افت آب زیرزمینی شده است که تقریباً در تمامی پیرومترهای قرار گرفته در این کاربری دیده می‌شود. با این حال شیب این افت در برخی از پیرومترهایی که در این کاربری قرار گرفته‌اند بیشتر است. این یافته‌ها اهمیت پایش مداوم و مدیریت کارآمد منابع آب زیرزمینی را برجسته می‌کند تا بتوان از پایداری این منابع در مناطق حساس مانند آبخوان مشهد-چناران اطمینان حاصل کرد. اعمال محدودیت‌های برداشت آب در مناطق شهری و کشاورزی با افت محسوس سطح آب‌زیرزمینی، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی،

- eastern river basin of West Bengal, India. *SN Applied Sciences*, 2, p. 507. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2302-6>
12. Hamed, K. H. and Ramachandra Rao, A., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204, pp. 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
  13. Heidarizadeh, Z., Mohammadi, Y. and Sorayy A., 2019. Evaluation of groundwater status in Mehran Plain and factors affecting the quantity of these resources. *Hydrogeology*, 3(2), pp. 59-68. <https://doi.org/10.22034/hydro.2019.6175>
  14. Kendall, M. G., 1948. Rank correlation methods. Griffin.
  15. Khorasan Razavi Regional Water Company., 2016. *Report on the Updated Water Balance of the Qaraqum Water Basin, Volume Five, Appendix Number 7, Water Resources Balance of the Mashhad Study Area (Code 6007)* [In Persian]
  16. Khorasan Razavi Regional Water Company., 2018. *Proposal for the Prohibition of 13 Plains in Khorasan Razavi Province, Prohibition report of Mashhad-Chenaran Study Area (Study Area Code 6007)* [In Persian]
  17. Kumari, S., Kumar, D., Kumar, M. and Pande, C.B., 2023. Modeling of standardized groundwater index of Bihar using machine learning techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 130, p. 3395. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103395>
  18. Liu, Y., Lu, C., Qiu, B., Wang, J., Chen, J., Zhang, Y., Wu, C., Liu, B. and Shu, L., 2024. Spatiotemporally non-stationary evolution of groundwater levels in Poyang Lake Basin driven by meteorological and hydrological factors. *Science of The Total Environment*, 950, p. 175244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175244>
  19. Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, V. P. and Mohan, C., 2018. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, pp. 901-927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>
  20. Mahammad, S., Islam, A. and Shit, P.K., 2023. Geospatial assessment of groundwater quality using entropy-based irrigation water quality index and heavy metal pollution indices. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, pp. 116498-116521. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20665-5>
  2. Alley, W.M., 1985. The Palmer drought severity index as a measure of hydrologic drought 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 21, pp. 105-114.
  3. Arjmand Sharif, M. and Jafari, H., 2022. 'Groundwater Recharge Estimating in Mashhad-Chenaran Aquifer using water table fluctuations method (MRC algorithm)', *Hydrogeology*, 6(2), pp. 151-168. doi: 10.22034/hydro.2022.13427 [In Persian]
  4. Ashraf, S., Nazemi, A. and Aghakouchak, A., 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11, p. 9135. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y>
  5. Babre, A., Kalvāns, A., Avotniece, Z., Retiķe, I., Bikše, J., Popovs, K., Jemeljanova, M., Zelenkevičs, A. and Dēliņa, A., 2022. The use of predefined drought indices for the assessment of groundwater drought episodes in the Baltic States over the period 1989–2018. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, p. 101049. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101049>
  6. Bloomfield, J. and Marchant, B., 2013a. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 4769-4787.
  7. Bloomfield, J. and Marchant, B., 2013b. Analysis of groundwater drought using a variant of the Standardised Precipitation Index. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10.7574.7537.
  8. Dangar, S., Asoka, A. and Mishra, V., 2021. Causes and implications of groundwater depletion in India: A review. *Journal of Hydrology*, 596, p. 126103. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126103>
  9. Dubois, E. and Larocque, M., 2024. Contribution of standardized indexes to understand groundwater level fluctuations in response to meteorological conditions in cold and humid climates. *Journal of Hydrology*, 634, p. 131105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131105>
  10. Haghshenas Haghighi, M. and Motagh, M., 2024. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10, eadk3039. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039>
  11. Halder, S., Roy, M.B. and Roy, P.K., 2020. Analysis of groundwater level trend and groundwater drought using Standard Groundwater Level Index: a case study of an

- projection of future trend. *Journal of the Geological Society of India*, 85, pp. 232-242 . <https://doi.org/10.1007/s12594-015-0209-4>.
30. Pettitt, A. N., 1980. A simple cumulative sum type statistic for the change-point problem with zero-one observations. *Biometrika*, 67, pp. 79-84 .
  31. Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A. and Stolle, F., 2022. The global 2000-2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 856903 . <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>
  32. Prajapati, R., Upadhyay, S., Talchabhadel, R., Thapa, B.R., Ertis, B., Silwal, P. and Davids, J.C., 2021. Investigating the nexus of groundwater levels, rainfall and land-use in the Kathmandu Valley, Nepal. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, p. 100584. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100584>
  33. Ramirez, S.G., Hales, R.C., Williams, G.P. and Jones, N.L., 2022. Extending SC-PDSI-PM with neural network regression using GLDAS data and Permutation Feature Importance. *Environmental Modelling & Software*, 157, p. 105475. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105475>
  34. Roy, S., Taloor, A.K. and Bhattacharya, P., 2023. A geospatial approach for understanding the spatio-temporal variability and projection of future trend in groundwater availability in the Tawi basin, Jammu, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, p. 100912. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100912>
  35. Sahoo, S., Swain, S., Goswami, A., Sharma, R. and Pateriya, B., 2021. Assessment of trends and multi-decadal changes in groundwater level in parts of the Malwa region, Punjab, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, p. 100644. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100644>
  36. Secci, D., Tanda, M. G., D'oria, M., Todaro, V. and Fagandini, C., 2021. Impacts of climate change on groundwater droughts by means of standardized indices and regional climate models. *Journal of Hydrology*, 603, p. 127154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127154>
  37. Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63, pp. 1379-1389 .
  21. Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, pp. 245-259 .
  22. Mcbratney, A., 2004. Everitt, BS, 2002. The Cambridge Dictionary of Statistics. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 410 pp. ISBN 0 521 81099. AU \$75. *Geoderma*, 1, pp. 155-156 .
  23. Mirboluki, A., Mehraein, M., Kisi, O., Kuriqi, A. and Barati, R., 2024. Groundwater level estimation using improved deep learning and soft computing methods. *Earth Science Informatics*, 17, pp. 2587-2608 . <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01300-y>
  24. Mohammed, S. H., Flores, Y. G., Al-Manmi, D.A.M., Mikita, V. and Szűcs, P., 2024. Assessment of groundwater level fluctuation using integrated trend analysis approaches in the Kapran sub-basin, North East of Iraq. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, p. 101292. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101292>
  25. Monir, M.M., Sarker, S.C., Sarkar, S.K., Ahmed, M., Mallick, J. and Islam, A.R.M.T., 2023. Groundwater level fluctuations and associated influencing factors in Rangpur District, Bangladesh, using modified Mann-Kendall and GIS-based AHP technique. *Theoretical and Applied Climatology*, 153, pp. 1323-1339. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04541-x>
  26. Mukhawana, M.B., Kanyerere, T., Kahler, D., Masilela, N.S., Lalumbe, L. and Umunezero, A.A., 2024. Hydrological drought assessment using the standardized groundwater index and the standardized precipitation index in the Berg River Catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, p. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101779>
  27. Nanditha, H., Reshmidevi, T., Simha, L. U. and Kunhikrishnan, P., 2024. Statistical analysis of rainfall and groundwater interaction in Bhadra catchment. *Environment, Development and Sustainability*, 26, pp. 16267-16287 . <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03237-6>
  28. Nourmohamadi, S., Tajbakhsh, S.M., and Memarian, H., 2017. A Study on the Impact of Climatic Factors on Groundwater Resources Using Spatio-Temporal Analysis of Statistical Time Series (Case Study: Mashhad Plain, Kasahfroud Basin), *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), pp. 19-44. doi: 10.22067/geo.v6i3.60760 [In Persian]
  29. Patle, G., Singh, D., Sarangi, A., Rai, A., Khanna, M. and Sahoo, R., 2015. Time series analysis of groundwater levels and

38. Sethi, R.R., Dandapat, A.K., Sankalp, S., Panda, D., Jena, S. and Sarangi, A., 2024. Analyzing time series variations in groundwater levels within the Baitarani River Basin, India. *Environmental Earth Sciences*, 83, p. 363. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11650-x>
39. Siddik, M. S., Tulip, S.S., Rahman, A., Islam, M.N., Haghighi, A.T. and Mustafa, S. M.T., 2022. The impact of land use and land cover change on groundwater recharge in northwestern Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, 315, p. 115130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115130>
40. Singh, O., Kasana, A., Singh, K. P. and Sarangi, A., 2020. Analysis of Drivers of Trends in Groundwater Levels Under Rice–Wheat Ecosystem in Haryana, India. *Natural Resources Research*, 29, pp. 1101-1126. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09477-6>
41. Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., Ren, M. and Wang, G., 2020. Re-evaluation of the power of the Mann-Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series. *Frontiers in Earth Science*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>