



Evaluation of Quantitative and Qualitative Groundwater Monitoring Network of Dez Plain Using Entropy Theory

Leila Moradipour¹ | Ahmad Fathi² | Farshad Ahmadi³

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: Leilamoradi.lm62@gmail.com
2. Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: A.fathi@scu.ac.ir
3. Corresponding author, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: F.ahmadi@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 28 July 2023

Received in revised form

24 August 2023

Accepted 7 September 2023

Published online 17 January 2024

Keywords:

Continuous monitoring

Information transfer

Mann-Kendall

Mutual influence

ABSTRACT

In this study, entropy theory and the modified Mann-Kendall test were used to monitoring the quality and quantity of groundwater in the Dez Plain regarding temporal and spatial changes, as well as the excess and deficiency of stations in the aquifer. The values of groundwater level (28 stations), electrical conductivity and chlorine (30 stations) in the period of 1999-2019 were investigated in this study. The results of the analysis of trend changes show major increasing trend in qualitative values (80% of stations) and major decreasing trend in groundwater level values (53 percent of stations). The multivariable regression model has an average error of 0.10 mg/liter in the simulation of chlorine values, 15 $\mu\text{m}/\text{cm}$ for the simulation of electrical conductivity values, and 0.49 m in the simulation of groundwater level values. By examining the entropy theory, the values of the information transfer index indicated the average conditions of the groundwater level and relatively excess conditions of qualitative values in terms of information transfer in the region. The transmission of chlorine information in the southwest of the aquifer and the transmission of groundwater level information in the southeast of the aquifer are in a state of deficiency. According to the existing conditions regarding the quantitative monitoring and electrical conductivity monitoring of the groundwater, the Dez aquifer is in a good condition and the distribution of the stations is also suitable, but regarding the optimal monitoring of the aquifer in terms of transmission of chlorine information, the need for a station in the southeast of the aquifer is felt. By ranking the stations using net exchange information, the best stations were introduced in terms of quantitative and qualitative values.

Cite this article: Moradipour, L., Fathi, A., & Ahmadi, F. (2024). Evaluation of Quantitative and Qualitative Groundwater Monitoring Network of Dez Plain Using Entropy Theory. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (4), 945-964. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.362989.1093>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.362989.1093>

Publisher: The University of Tehran Press.



ارزیابی شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت دز با استفاده از تئوری آنتروپی

لیلا مرادی پور^۱ | احمد فتحی^۲ | فرشاد احمدی^۳۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران رایانامه: Leilamoradi.lm62@gmail.com۲. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: A.fathi@scu.ac.ir۳. نویسنده مسئول، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: F.ahmadi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

در این مطالعه جهت پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی آبخوان دشت دز فول در خصوص بررسی تغییرات زمانی و مکانی و همچنین بررسی افزونگی و کمبود ایستگاه در محدوده آبخوان از تئوری آنتروپی و آزمون من-کندال اصلاح شده استفاده شد. مقادیر سطح آب زیرزمینی (۲۸ ایستگاه)، هدایت الکتریکی و کلر (۳۰ ایستگاه) در بازه زمانی ۹۸-۱۳۷۸ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی تغییرات روند نشان دهنده عمده تغییرات افزایشی مقادیر کیفی (۸۰ درصد ایستگاه‌ها) و عمده تغییرات کاهش‌ی مقادیر سطح آب زیرزمینی (۵۳ درصد ایستگاه‌ها) می‌باشد. جهت بررسی اثر متقابل ایستگاه‌های مورد مطالعه از آزمون رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. مدل رگرسیون چندمتغیره به‌طور متوسط میزان خطایی برابر با ۰/۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در شبیه‌سازی مقادیر کلر، ۱۵ میکروموس بر سانتی‌متر برای شبیه‌سازی مقادیر هدایت الکتریکی و ۰/۴۹ متر در شبیه‌سازی مقادیر سطح آب زیرزمینی را ارائه کرد. با بررسی تئوری آنتروپی، مقادیر شاخص انتقال اطلاعات نشان دهنده شرایط متوسط سطح آب زیرزمینی و شرایط نسبتاً مازاد مقادیر کیفی از نظر تبادل اطلاعات در منطقه بود. انتقال اطلاعات کلر در جنوب‌غربی آبخوان و انتقال اطلاعات سطح آب زیرزمینی در جنوب‌شرقی آبخوان در حالت کمبود قرار دارد. با توجه به شرایط موجود در خصوص پایش کمی و پایش هدایت الکتریکی آب زیرزمینی، آبخوان دز فول در شرایط مناسبی قرار داشته و پراکندگی ایستگاه‌ها نیز مناسب می‌باشد، اما در خصوص پایش پهنه آبخوان از نظر انتقال اطلاعات کلر، نیاز به وجود ایستگاه در جنوب‌شرقی آبخوان احساس می‌شود. با رتبه‌بندی ایستگاه‌ها با استفاده از اطلاعات خالص تبدالی، ایستگاه‌های برتر در مورد مقادیر کمی و کیفی معرفی شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

کلیدواژه‌ها:

انتقال اطلاعات

پایش مستمر

تأثیر متقابل

من-کندال

استناد: مرادی پور، لیلا؛ فتحی، احمد و احمدی، فرشاد (۱۴۰۲). ارزیابی شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت دز با استفاده از تئوری آنتروپی. نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۴)، ۹۴۴-۹۴۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.362989.1093>

۱. مقدمه

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع آبی در هر کشور و به‌ویژه در ایران می‌باشد. برای بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در مصارف مختلف و اهداف گوناگون ضروری است که اطلاعات دقیق از خصوصیات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی وجود داشته باشد. برای رسیدن به هدف یادشده، پایش منابع یادشده ضروری است. مدیریت منابع آب زیرزمینی نیازمند یک پایش مستمر و دقیق با توزیع مناسب زمانی و مکانی است. یافتن حداقل تعداد چاه جهت پایش دقیق با حداکثر توزیع مکانی برای اقتصادی کردن سامانه‌های پایش آب زیرزمینی بسیار موردنیاز است. بنابراین ساختار شبکه پایش منابع آب زیرزمینی و همچنین تعداد چاه‌های موردنیاز، یک مسئله بهینه‌سازی مهندسی است. در طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی از حیث کمیت و کیفیت، حداقل تعداد ایستگاه‌های پایش با توزیع مناسب از نظر اقتصادی موردنیاز است (Tabatabaei *et al.*, 2022).

اولین قدم در پایش شبکه‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی، بررسی روند تغییرات آن در دوره‌های آماری مختلف می‌باشد که با استفاده از آزمون من-کندال به سادگی قابل اجرا می‌باشد (Tabatabaei *et al.*, 2022). در بررسی دقیق‌تر شبکه پایش، از جهت افزونگی و کمبود ایستگاه و همچنین رتبه‌بندی ایستگاه‌ها از تئوری آنتروپی می‌توان استفاده کرد (Nazeri Tahroudi *et al.*, 2019a). Shannon (1948) و Jaynes (1957) بنیان‌گذار تئوری آنتروپی در علوم و فناوری بودند. در زمینه پایش کمی و کیفی منابع آب این روش در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

Mogheir and Singh (2002) با استفاده از معیارهای به حداکثر رساندن اطلاعات و به حداقل رساندن هزینه، روشی برای طراحی یک شبکه بهینه پایش آب زیرزمینی برای مدیریت منابع آب در بخشی از نوار غزه در فلسطین ایجاد کردند. آن‌ها بیان کردند که سیستم نظارت در اصل یک سیستم جمع‌آوری اطلاعات است. بنابراین، طراحی فنی آن نیازمند یک اندازه‌گیری کمی از اطلاعات است که می‌تواند از طریق استفاده از نظریه اطلاعات (یا آنتروپی) به دست آید. این تئوری همچنین معیارهای آماری مبتنی بر اطلاعات را برای ارزیابی کارایی شبکه نظارت ارائه می‌کند. Mogheir *et al.* (2009) بیان کردند که انتخاب تعداد و مکان چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی ممکن است نیازمند در نظر گرفتن جنبه‌های مختلفی مانند اهداف پایش، دفعات زمانی پایش و هزینه‌های پایش می‌باشد. آن‌ها، این جنبه‌ها را با استفاده از مشاهدات متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی که دو بار در سال در ۱۲۴ چاه در قسمت شمالی نوار غزه انجام می‌شود، مورد بررسی قرار دادند. با در نظر گرفتن این ویژگی‌ها، شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی را با استفاده از آنتروپی مورد ارزیابی و بازطراحی قرار دادند. روش ارزیابی براساس بیان اطلاعات تبدیل به‌عنوان تابعی از فاصله بین چاه‌ها بود. مشخص شد که تعداد و مکان چاه‌های نظارت بر کیفیت آب زیرزمینی در صورتی که این جنبه‌ها در فرایند ارزیابی و طراحی مجدد گنجانده شوند، متفاوت است.

Nazeri Tahroudi *et al.* (2019b) با استفاده از تئوری آنتروپی شبکه کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت نقده واقع در شمال غرب ایران را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روش ارائه شده کارایی بالایی در بهینه‌یابی شبکه پایش آب زیرزمینی دارد. Gautam *et al.* (2022) به بررسی شاخص کیفیت آب آنتروپی (EWQI) و شاخص جدید کیفیت آب یکپارچه (IWQI) برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی شهر پرایاگراج، هند پرداختند. آن‌ها بیان کردند که براساس EWQI، آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب خوب و مناسب در دوره قبل و بعد از موسمی هستند. IWQI نشان داد که در زمان پیش از موسمی کیفیت آب در ۱۷ درصد منطقه برای شرب نامناسب است که ۲۵ درصد سطح آن کیفیت آب نامناسبی دارد، اما در زمان پس از بارش موسمی همین مساحت به ترتیب به ۲۵ درصد و ۴۲ درصد افزایش یافته است.

Tabatabaei *et al.* (2022) به بررسی شبکه باران‌سنجی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنج در زیرحوضه تازه کند در جنوب غربی دریاچه ارومیه، ایران با استفاده از رویکرد آنتروپی مبتنی بر مفصل پرداختند. اثرات متقابل ایستگاه‌ها با

استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مبتنی بر مفصل در پژوهش آن‌ها بررسی شد. R-vine پس از بررسی مفصل‌های واین مختلف به‌عنوان مفصل برتر انتخاب شد. برآورد شاخص‌های ITI و N(i) هر ایستگاه با استفاده از تئوری آنتروپی، کمبود ایستگاه‌ها را در منطقه موردبررسی آن‌ها نشان داد. همچنین نتایج رتبه‌بندی پژوهش آن‌ها نشان داد که ایستگاه‌ها از نظر ارتباط با سایر ایستگاه‌ها و پوشش راحت دشت مناسب‌ترین ایستگاه است.

Bageri *et al.* (2023) از تئوری آنتروپی مبتنی بر جنگل تصادفی برای پایش کیفی هدایت الکتریکی (EC) و کل جامدات محلول (TDS) در آب‌های زیرزمینی ۱۲ حلقه چاه در دشت تسوج واقع در جنوب دریاچه ارومیه از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۸ استفاده کردند. به‌منظور بررسی اثر متقابل چاه‌ها آن‌ها از روش الگوریتم جنگل تصادفی استفاده کردند. با توجه به پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات، نتایج آن‌ها نشان داد که هیچ محدودیتی در پایش مقادیر EC در آبخوان وجود ندارد و پراکندگی چاه‌ها در بهترین حالت است.

مرور منابع نشان می‌دهد که این تئوری به‌خوبی و با دقت و قطعیت بالا می‌تواند پایش خوبی بر منابع آب زیرزمینی داشته باشد. با وجود تغییرات اقلیمی و مقادیر حدی در سال‌های اخیر، لزوم پایش منابع آب زیرزمینی بیش از پیش اهمیت داشته و این موضوع بهتر است هر ساله انجام شود. به‌طور کلی، پایش کیفیت و کمیت منابع آب، یک سیستم حیاتی پشتیبان در جهت تصمیم‌گیری و مدیریت آب به‌حساب می‌آید. این موضوع می‌تواند کیفیت منابع آب زیرزمینی را نیز تحت‌الشعاع قرار دهد. از این‌رو، جهت دسترسی بهتر به منابع آب با کیفیت و همچنین تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص منابع آب و طبقه‌بندی منابع آب و ایستگاه‌های اندازه‌گیری آن لازم است پایش مستمر در خصوص مقادیر کمی و کیفی آب زیرزمینی صورت گیرد. این پایش می‌تواند به‌صورت مقدماتی و با استفاده از بررسی روند تغییرات مقادیر کمی و کیفی صورت گیرد و یا به‌صورت کلی و با رتبه‌بندی چاه‌ها و بررسی تغییرات اطلاعات در حوضه باشد. مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه یکی از حوزه‌های کمی و کیفی را بررسی کرده‌اند، درحالی‌که این مطالعه در نظر دارد هر دو حوزه را موردبررسی قرار داده و علاوه بر تئوری آنتروپی، به رتبه‌بندی ایستگاه‌ها از حیث اهمیت نگه داشت آن در شبکه پردازد، تغییرات سالانه را با حذف اثرات خودهمبستگی داخلی بررسی کرده و اطلاعات خالص تبدلی را برآورد کند. از این‌رو، هدف از این مطالعه، ضمن ارزیابی شبکه پایش کمی و کیفی آبخوان دشت دز با استفاده از تئوری آنتروپی و همچنین بررسی روند تغییرات مقادیر موردبررسی است.

۲. مواد و روش‌ها

دشت دزفول - اندیمشک به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشد. این دشت در ۱۳۰ کیلومتری از شهرستان اهواز و در پایین‌دست سد دز قرار گرفته است که مساحتی بیش از ۲۰۷۰ کیلومترمربع را شامل می‌شود. در این مطالعه از مقادیر کمیت (سطح آب زیرزمینی) و کیفیت آب زیرزمینی شامل هدایت الکتریکی (EC) برحسب میکروموس بر سانتی-متر و کلر (Cl) برحسب میلی‌گرم بر لیتر در دوره آماری ۱۳۷۸-۱۳۹۸ در مقیاس سالانه استفاده شده است که پارامترهای یاد شده از ۳۰ حلقه چاه مشاهداتی استخراج شده است. موقعیت چاه‌های مورد مطالعه به شرح شکل (۱) و متوسط تغییرات و خطوط کنتور داده‌های موردبررسی به‌صورت شکل (۲) می‌باشد.

۲.۱. بررسی تغییرات روند با استفاده از آزمون من-کندال

آزمون من-کندال در مطالعات مختلفی موردبررسی قرار گرفته و عملکرد آن تأیید شده است (Khalili *et al.*, 2016; Ahmad *et al.*, 2018; Ahmadi *et al.*, 2022; Rostami *et al.*, 2022). آماره آزمون من-کندال به‌صورت زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (\text{رابطه ۱})$$

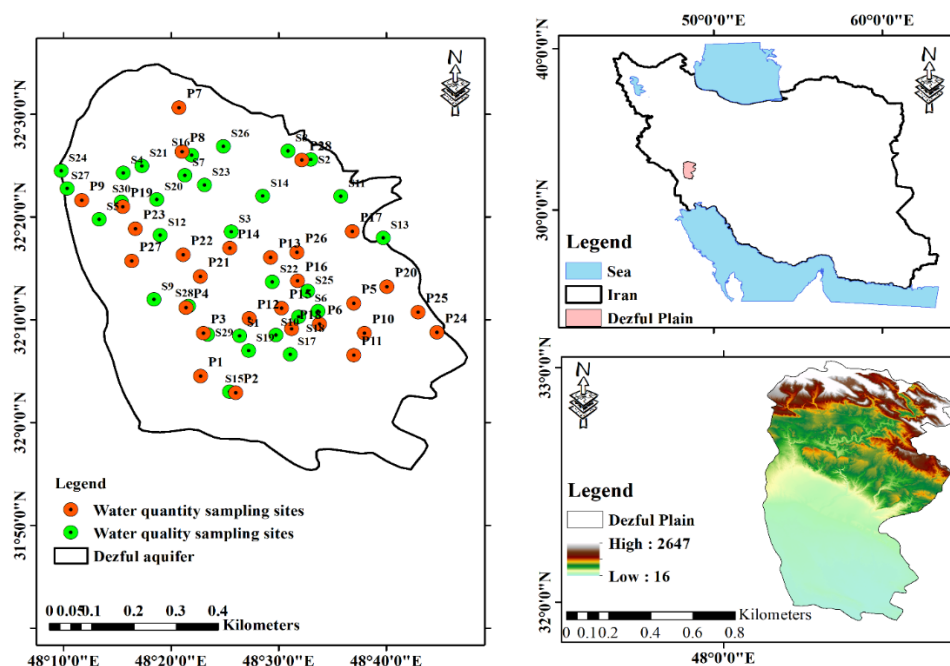


Figure 1. Location of studied wells in Iran and Dezful aquifer

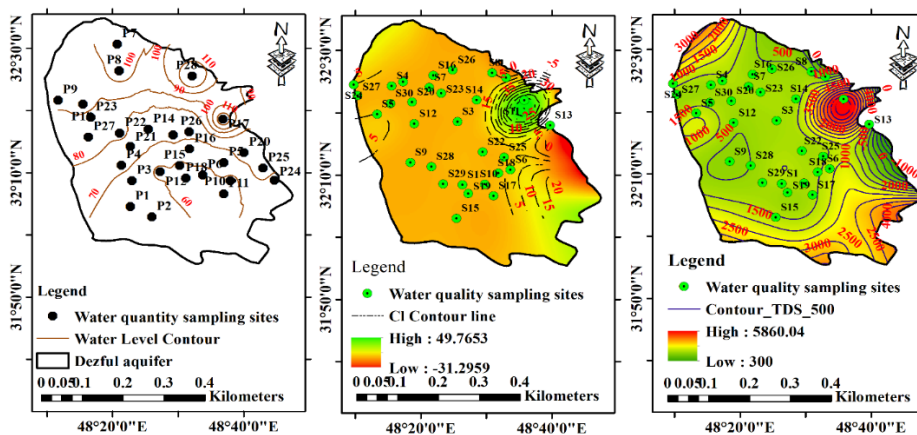


Figure 2. The mean values and contour line of the examined data

که در آن، x_j برابر با مقادیر متوالی، n برابر با طول سری زمانی و $sgn(\theta)$ نیز تابع علامت است که شرح زیر برآورد می‌گردد (Mann, 1945; Kendall, 1975):

$$sgn(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \tag{۲}$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \tag{۳}$$

که در این روابط، $V(S)$ برابر با واریانس داده‌ها، و t_i برابر با تعداد داده‌های یکسان در دسته t_i ام است. در نهایت آماره

استاندارد شده Z به صورت زیر است:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

سطح معنی داری پنج درصد، در صورتی که آماره Z بیش از ۱/۹۶ و کمتر از -۱/۹۶ باشد، تغییرات روند به ترتیب صعودی و نزولی معنی دار است. جهت بررسی بزرگی روند در مطالعات مختلف از شاخص شیب خط روند یا شیب سن استفاده که به صورت زیر برآورد می شود (Thiel, 1950; Sen, 1968):

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall i < j \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن، β شیب خط روند و X_i و X_j به ترتیب مقادیر مشاهداتی i ام و j ام هستند با توجه به این که وجود خودهمبستگی داخلی در سری های زمانی، بحث روش من-کندال اصلاح شده توسط Kumar *et al.* (2009) مطرح شد. در این روش اثر ضریب خودهمبستگی (r_k) محاسبه می شود و در صورت معنی دار بودن آن، از سری زمانی حذف می شود:

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

خودهمبستگی داده ها در صورت معنی دار بودن حذف می گردد در ابتدا شیب خط روند از سری زمانی به صورت رابطه (۷) حذف می گردد:

$$x'_i = x_i - (\beta \times i) \quad \text{رابطه (۷)}$$

سپس مؤلفه ضریب خودهمبستگی از سری جدید حذف می شود و سری باقیمانده ها (y'_i) از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$y'_i = x'_i - r_1 \times x'_{i-1} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در نهایت، شیب خط روند به سری زمانی جدید اضافه می شود که سری نهایی (y_i) به شرح زیر به خواهد بود:

$$y_i = y'_i + (\beta \times i) \quad \text{رابطه (۹)}$$

حال با اعمال آزمون من-کندال، وجود روند بررسی می شود (Hamed and Rao, 1998; Burn and Elnur, 2002; Lu *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2009; Khaliq *et al.*, 2009).

۲.۲. تئوری آنتروپی

این تئوری در سال ۱۹۴۸ توسط شانون براساس انتقال اطلاعات مطرح شد. با وجود دو متغیر x و y که $x_i, i=1,2,3, \dots, n$ و $y_j, j=1,2,3, \dots, m$ ، یک احتمال وقوع گسسته $p(x_i)$ ، احتمال وقوع مشترک $p(x_i, y_j)$ و احتمال x_i به شرط y_j $p(x_i | y_j)$ وجود دارد. در این صورت، آنتروپی حاشیه ای به صورت زیر است:

$$E(I(x)) = H(x) = - \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن، $E(I(x))$ امید ریاضی می باشد. آنتروپی مشترک در تئوری شانون را می توان به صورت زیر برآورد کرد:

$$H(x, y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

آنتروپی شرطی نشان دهنده داده‌هایی از x است که در y موجود نمی‌باشد و به صورت زیر برآورد می‌شود (Mogheir and Singh, 2002).

$$H(x|y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i|y_j) \ln p(x_i|y_j) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

و در نهایت آنتروپی انتقال اطلاعات است که می‌توان به عنوان اطلاعاتی از x بیان شود که در y موجود است (Tabatabaei et al., 2022).

$$T(x, y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln \left(\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

که در آن، $p(x)$ احتمال وقوع x ، $p(x, y)$ برابر با احتمال وقوع مشترک x و y و $p(x|y)$ نیز برابر با احتمال وقوع x به شرط y است.

مهم‌ترین شاخص مورد استفاده در تئوری آنتروپی، شاخص انتقال اطلاعات (ITI) است که به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$ITI = \frac{T(x, y)}{H(x, y)} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

این شاخص نشان دهنده افزونگی یا کمبود هر ایستگاه را نشان دهد. مقادیر کمتر از $0/2$ در این شاخص نشان دهنده کمبود شدید، مقادیر بین $0/2$ و $0/4$ نشان دهنده کمبود، مقادیر بین $0/4$ و $0/6$ نشان دهنده شرایط متوسط، مقادیر $0/6$ تا $0/8$ نشان دهنده شرایط نسبتاً مازاد و مقادیر بیش از $0/8$ نیز نشان دهنده شرایط مازاد می‌باشد (Tabatabaei et al., 2022).

شاخص $N(i)$ یا شاخص اطلاعات خالص تبدالی که در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها استفاده می‌شود، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

مقادیر شاخص $N(i)$ مثبت نشان دهنده اهمیت بالای ایستگاه و مقادیر منفی نشان دهنده اهمیت ضعیف ایستگاه می‌باشد. از بین مقادیر مثبت نیز، مقادیر بالاتر از اهمیت بیش‌تری برخوردار هستند (Nazeri Tahroudi et al., 2019a). در رابطه (۱۵)، دو شاخص $R(i)$ و $S(i)$ به ترتیب نشان دهنده اطلاعات ارسالی و اطلاعات دریافتی است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$S(i) = S(x(i), \hat{x}(i)) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

که در این روابط، $x(i)$ برابر با داده‌های چاه i ام و $\hat{x}(i)$ مقادیر شبیه‌سازی شده با رگرسیون چندمتغیره می‌باشد. در این مطالعه جهت اجرای مدل رگرسیون چندمتغیره از محیط نرم‌افزار Minitab استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

در ابتدا به بررسی روند تغییرات مقادیر یاد شده در دوره آماری ۹۸-۱۳۸۷ پرداخته شد. در گام بعدی به بررسی پایش از حیث انتقال اطلاعات در منطقه پرداخته شده و ایستگاه‌های مورد مطالعه براساس شاخص‌های تئوری آنتروپی طبقه‌بندی شد.

۳.۱. نتایج بررسی تغییرات مقادیر کمی و کیفی مورد مطالعه

در این بخش به بررسی روند تغییرات مقادیر کمی و کیفی آب زیرزمینی در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از آزمون من-

کندال اصلاح شده پرداخته شد و نتایج در سطح معنی داری پنج درصد به صورت شکل (۳) ارائه شد. حدود اطمینان قرمز رنگ (نقطه چین) در این شکل نشان دهنده تغییرات معنی دار در سطح پنج درصد می باشد. با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود که تغییرات مقادیر کلر آب زیرزمینی را در بیش تر ایستگاه ها افزایشی است. روند تغییرات مقادیر کلر در مقیاس سالانه در شش ایستگاه S5، S6، S11، S17، S28 و S29 که ۲۰ درصد ایستگاه های مورد مطالعه را شامل می شود، کاهش می شود و در سایر ایستگاه ها افزایشی می باشد. تغییرات کاهش مقادیر کلر در ایستگاه های ذکر شده ترکیبی از روندهای کاهش معنی دار و غیر معنی دار را شامل شده است که در این بین، تغییرات کاهش معنی دار در سطح ۵ درصد در ایستگاه های S5، S17 و S29 مشاهده شد. روند تغییرات افزایشی مقادیر کلر در ایستگاه های S1، S3، S4، S8، S13، S15، S16، S21، S22 و S24 در سطح پنج درصد معنی دار و سایر روندهای افزایشی در سطح پنج درصد غیر معنی دار می باشند. روند تغییرات افزایشی در منطقه مورد مطالعه ۸۰ درصد ایستگاه ها را شامل می شود که نشان دهنده افزایش کلر موجود در آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری ۱۳۷۸-۹۸ می باشد.

نتایج بررسی روند تغییرات مقادیر EC در طی دوره آماری ۹۸-۱۳۷۸ در منطقه مورد مطالعه نشان داد که همانند تغییرات کلر، تغییرات کاهش مقادیر هدایت الکتریکی در ۲۰ درصد ایستگاه ها کاهش می باشد که این تغییرات در ایستگاه های S5 و S29 در سطح پنج درصد معنی دار بوده و در ایستگاه های S6، S11، S17 و S28 در سطح پنج درصد کاهش غیر معنی دار می باشد. سایر ایستگاه های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه با تغییرات افزایشی در مقادیر هدایت الکتریکی مواجه هستند. تغییرات افزایشی معنی دار مقادیر هدایت الکتریکی در سطح پنج درصد در ایستگاه های S1، S4، S8، S9، S13، S14، S15 و S24 مشاهده شد. تغییرات افزایشی مقادیر کلر و هدایت الکتریکی می تواند کیفیت آب را تغییر داده و افزایش شوری و کلر موجود در آب زیرزمینی منطقه شده که استفاده آن در حوزه های مختلف اعم از کشاورزی و شرب و حتی صنعت را با مشکل مواجه می سازد. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مطابق شکل (۳) نشان داد که در ۵۷ درصد ایستگاه های مورد مطالعه روند تغییرات سطح آب زیرزمینی کاهش می باشد و در سایر ایستگاه ها افزایشی می باشد. روند تغییرات افزایشی در سطح پنج درصد در ایستگاه های P21 و P27 معنی دار می باشد. تغییرات کاهش مقادیر سطح آب زیرزمینی نیز در ایستگاه های P4، P17 و P20 نیز در سطح پنج درصد معنی دار می باشد.

بررسی تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای مختلف کمی و کیفی آب زیرزمینی از اقدامات اولیه پایش شبکه در هر حوضه می باشد. به همین دلیل در این مطالعه تغییرات مکانی مقادیر کمی و کیفی مورد بررسی نیز در سطح آبخوان بررسی شد. نتایج بررسی تغییرات مکانی مقادیر مورد مطالعه به شرح شکل های (۴) تا (۶) ارائه شد. عمده تغییرات روند مقادیر کلر در منطقه مورد مطالعه با توجه به شکل (۴) افزایشی می باشد و قسمت های از نواحی شرقی و جنوب شرقی آبخوان با کاهش مقادیر کلر مواجه شده است. تغییرات مقادیر کلر در مناطق مرکزی، مناطقی از جنوب غربی، شمال و شمال شرقی آبخوان مورد مطالعه افزایشی می باشد. مطابق شکل (۵) روند تغییرات کاهش مقادیر هدایت الکتریکی در آبخوان مورد مطالعه در نواحی جنوب شرقی و قسمت هایی از شمال شرق رخ داده است. بیش تر نواحی آبخوان مورد مطالعه با افزایش هدایت الکتریکی روبه رو بوده اند. این افزایش به دلیل کاهش تغذیه آبخوان و افت سطح آب در آبخوان مورد مطالعه می باشد که کیفیت آب این آبخوان را از نظر شرب، صنعت و کشاورزی تهدید می کند.

افزایش مقادیر هدایت الکتریکی و کلر در منطقه مورد مطالعه باعث کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است که استفاده از آب زیرزمینی را برای شرب تحت تأثیر قرار می دهد. Taj et al. (2018) نیز در پژوهش های خود در دشت دزفول بیان کردند که به علت پایین بودن شاخص کیفی آب زیرزمینی در منطقه، حتی الامکان باید از حفر چاه برای شرب جلوگیری نمود.

تغییرات سطح آب زیرزمینی نیز مطابق شکل (۶) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این شکل می‌توان تغییرات افزایشی و معنی‌داری را در نواحی شرقی آبخوان مشاهده کرد. عمده تغییرات مقادیر سطح آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه کاهش می‌باشد. تغییرات افزایشی بیشتر در نواحی مرکزی آبخوان مشاهده می‌شود.

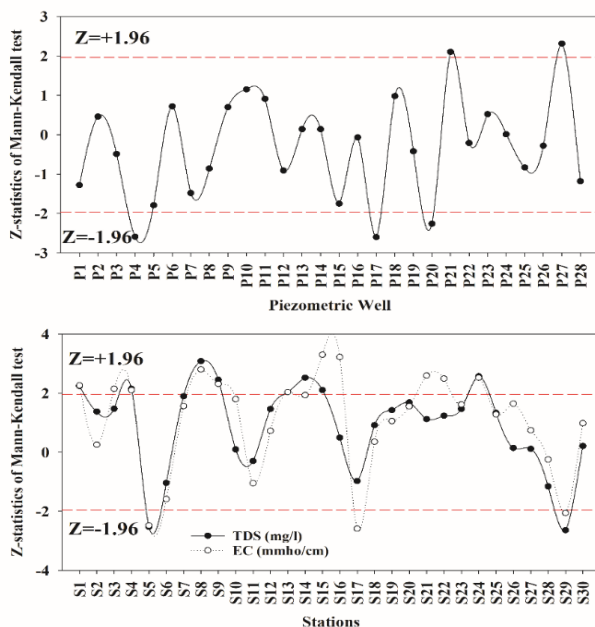


Figure 3. The results of examining the trend of changes in the studied values (Z-statistics of Mann-Kendall) in the period of 1999-2019

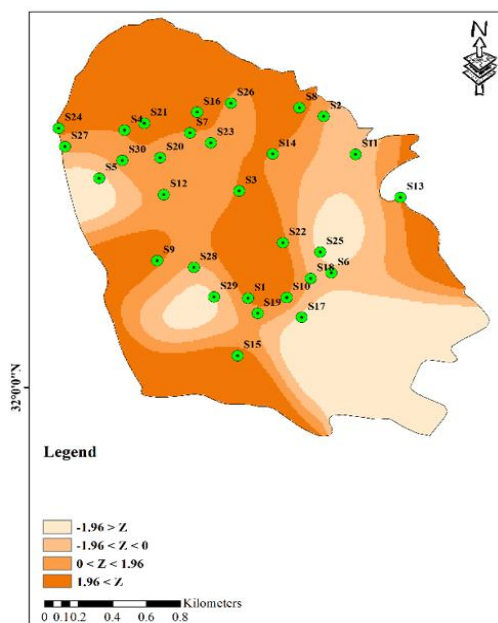


Figure 4. The results of spatial changes of chlorine values in the period of 1999-2019

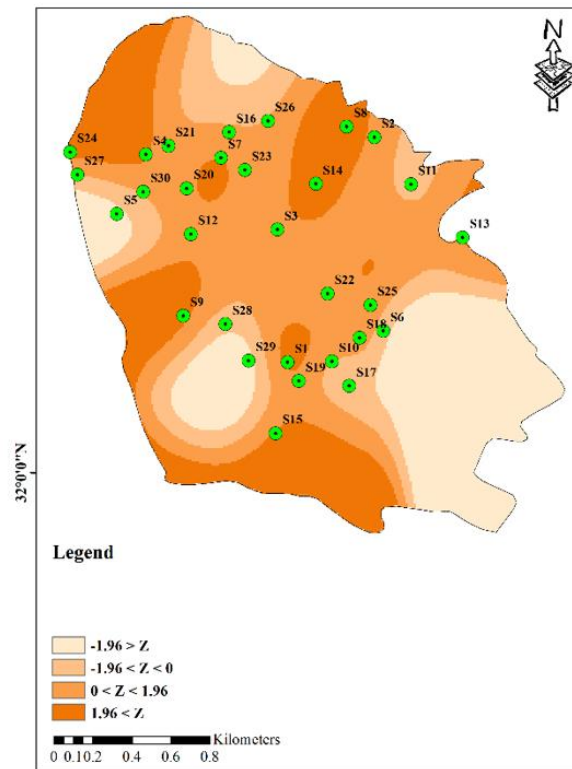


Figure 5. The results of spatial changes of electrical conductivity values in the period of 1999-2019

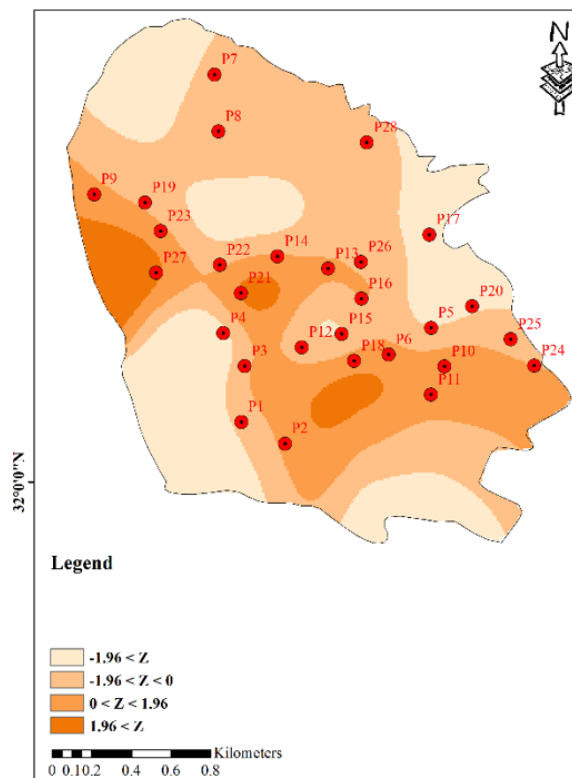


Figure 6. The results of spatial changes of groundwater level values in the period of 1999-2019

Adib and Zamani (2015) نیز در پژوهش‌ها در خصوص بررسی تغییرات مکانی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی دشت دز فول با استفاده از زمین‌آمار بیان کردند که نقشه‌های پهنه‌بندی فراسنج‌های مورد مطالعه حاکی از وضعیت نامطلوب کیفیت منابع آب زیرزمینی در قسمت‌های جنوب شرقی و شرقی دشت می‌باشند. تغییرات افزایشی معنی‌دار سطح آب زیرزمینی نیز در قسمت شرقی آبخوان نیز نشان‌دهنده افزایش دسترسی به سطح آب زیرزمینی در منطقه است. لازم به ذکر است پهنه‌بندی مقادیر مورد مطالعه در محدوده دشت با استفاده از روش spline و در محیط GIS صورت گرفته است که روشی رایج در بحث تئوری آنتروپی می‌باشد که در مطالعات مختلف نیز به کار رفته است (Nazeri Tahroudi *et al.*, 2019a; Tabatabaei *et al.*, 2022).

۲.۳. نتایج اجرای تئوری آنتروپی

در اجرای تئوری آنتروپی اولین گام شبیه‌سازی متغیرهای مورد مطالعه با استفاده از مقادیر سایر ایستگاه‌های موجود در آبخوان است تا تبادل اطلاعات چاه‌ها لحاظ شده و تأثیر متقابل ایستگاه‌ها بررسی شود. این موضوع در تئوری آنتروپی با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره انجام می‌شود.

۳.۳. نتایج بررسی تأثیر متقابل ایستگاه‌ها

در این مطالعه جهت بررسی تأثیر متقابل ایستگاه‌های مورد مطالعه نسبت به یکدیگر از روش مرسوم رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است. در ابتدا به بررسی همبستگی بین ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از آماره R^2 پرداخته شد. جهت شبیه‌سازی مقادیر مورد مطالعه و بررسی اثر متقابل ایستگاه‌ها سعی شد مقادیر کمی و کیفی ایستگاه‌هایی در محاسبات دخالت داده شود که همبستگی مناسبی داشته باشند.

با انتخاب ایستگاه‌های برتر متناسب با هر پارامتر، شبیه‌سازی مقادیر کمی و کیفی مورد مطالعه با استفاده از رگرسیون چندمتغیره انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مقادیر کمی و کیفی مورد مطالعه با استفاده از دو آماره جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و نش-ساتکلیف (NSE) بررسی و صحت‌سنجی شد. نتایج بررسی آماره‌های خطا و ارزیابی مدل رگرسیون چندمتغیره در شبیه‌سازی مقادیر کمی و کیفی به صورت شکل‌های (۷) و (۸) برای مقادیر کلر ۹ و ۱۰ برای مقادیر هدایت الکتریکی و ۱۱ و ۱۲ نیز برای مقادیر سطح آب زیرزمینی ارائه شد. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که بیش‌ترین میزان خطا در شبیه‌سازی مقادیر کلر با استفاده از رگرسیون چندمتغیره و دخالت سایر ایستگاه‌ها برابر با ۰/۱۳ میلی‌گرم بر لیتر و مربوط به ایستگاه‌های S10، S29 و S1 می‌باشد. کم‌ترین میزان خطا در شبیه‌سازی مقادیر کلر در منطقه مورد مطالعه نیز حدود ۰/۰۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. مدل رگرسیون چندمتغیره به‌طور متوسط میزان خطایی برابر با ۰/۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در شبیه‌سازی مقادیر کلر ارائه کرد. با بررسی میزان کارایی مدل با استفاده از ضریب نش-ساتکلیف، مشخص شد که متوسط میزان کارایی مدل رگرسیون چندمتغیره در شبیه‌سازی مقادیر کلر حدود ۰/۹۰ می‌باشد. با توجه به شکل (۸) می‌توان مشاهده کرد که به‌غیر از دو ایستگاه S2 و S29، سایر ایستگاه‌ها مقدار NSE بیش از ۰/۸۰ دارند. مطابق شکل (۹)، کم‌ترین (بیش‌ترین) مقدار خطا در شبیه‌سازی مقادیر هدایت الکتریکی با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره در محدوده آبخوان مورد مطالعه ۸/۷۴ (حدود ۲۱ میکروموس و مربوط به ایستگاه S10 (S26) می‌باشد. متوسط میزان خطا در شبیه‌سازی مقادیر هدایت الکتریکی در آبخوان مورد مطالعه نیز حدود ۱۵ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. متوسط کارایی ۰/۹۴ نیز با توجه به آماره NSE در شبیه‌سازی مقادیر هدایت الکتریکی حاصل شد. با توجه به شکل (۱۰)، به‌غیر از ایستگاه S2، مقادیر NSE در سایر ایستگاه‌ها بیش از ۰/۸۰ می‌باشد. متوسط خطای شبیه‌سازی

سطح آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه براساس آماره RMSE برابر با ۰/۴۹ متر برآورد شد. که با توجه به شکل (۱۱) می‌توان مشاهده کرد که بیش‌ترین مقدار خطا برابر با ۱/۵۲ متر و مربوط به ایستگاه P7 و کم‌ترین آن نیز برابر با ۰/۱۵ متر و مربوط به ایستگاه P1 می‌باشد. آماره NSE برخلاف دو پارامتر کیفی کلر و هدایت الکتریکی در منطقه مورد مطالعه، برای مقادیر سطح آب زیرزمینی متوسطی برابر با ۰/۶۳ برآورد کرد. مقادیر NSE در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۰/۹۰ مطابق شکل (۱۲) متغیر می‌باشد.

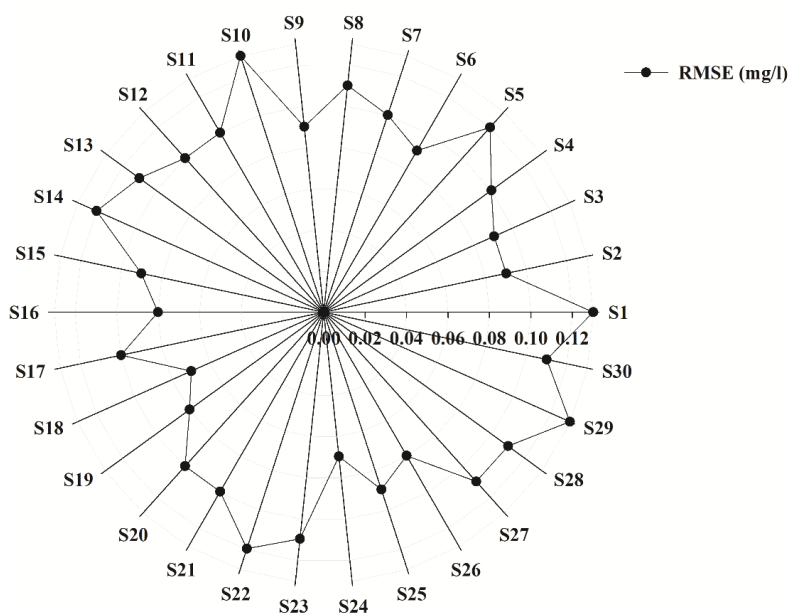


Figure 7. The results of estimating the amount of error rate in the simulation of chlorine values using the RMSE statistic

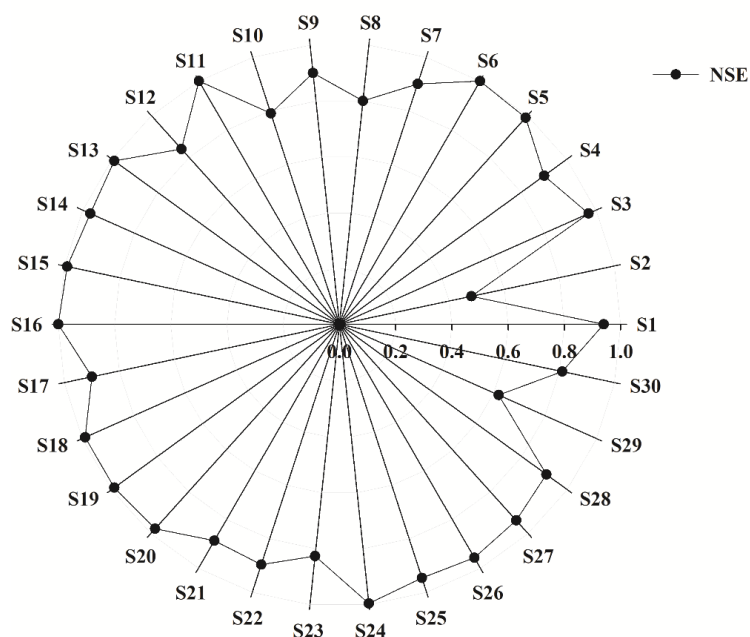


Figure 8. The results of estimating the effectiveness of the model in simulating chlorine values using NSE statistics

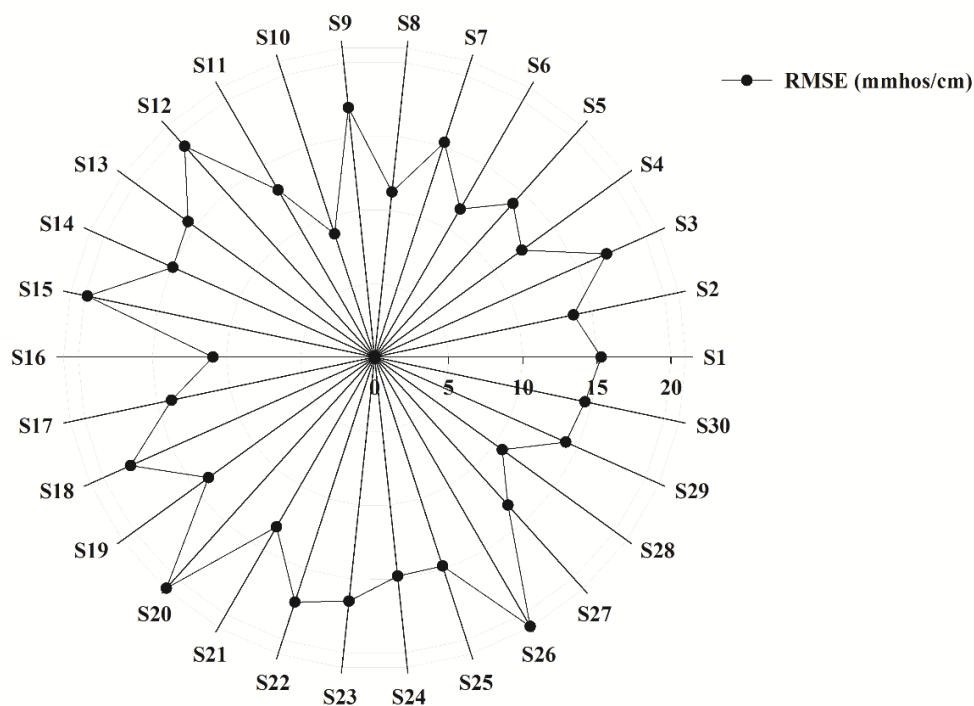


Figure 9. The results of estimating the amount of error rate in the simulation of electrical conductivity values using the RMSE statistic

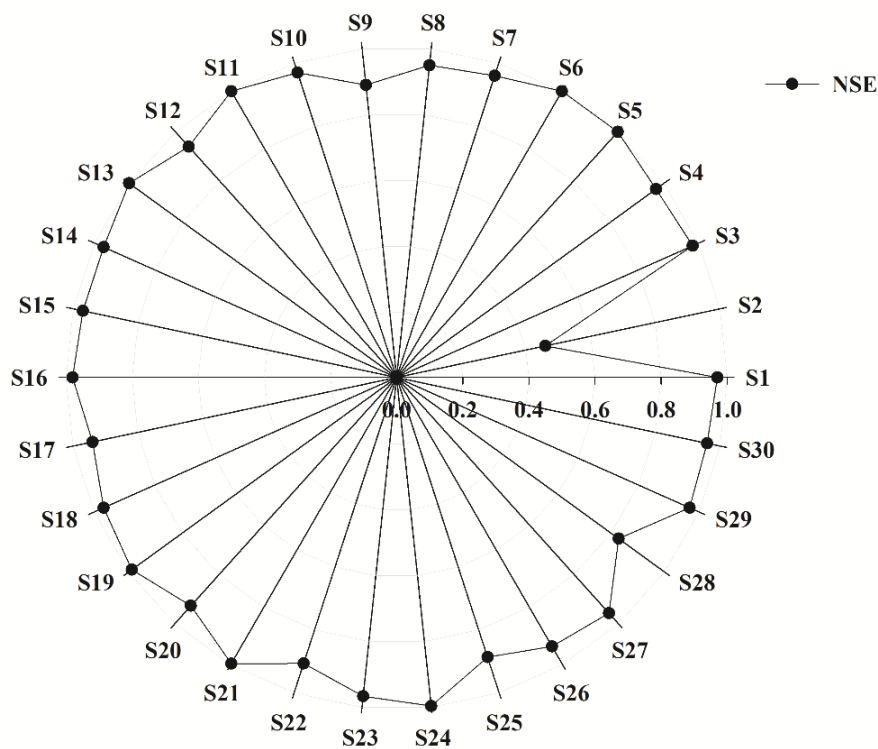


Figure 10. The results of estimating the efficiency of the model in simulating electrical conductivity values using the NSE statistic

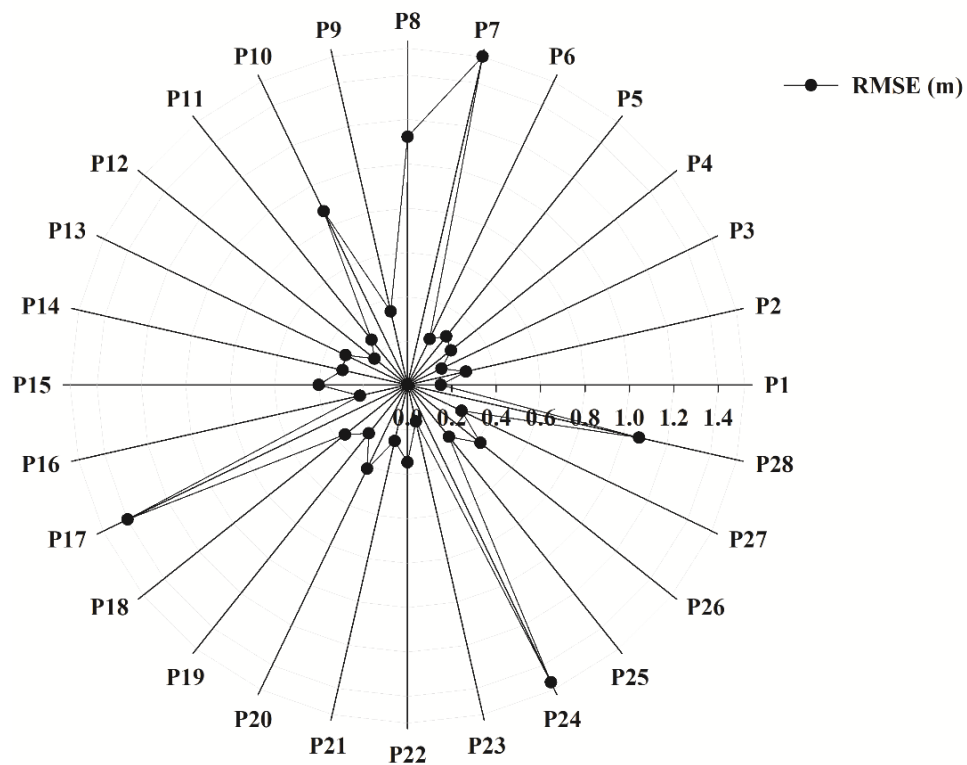


Figure 11. The results of estimating the amount of error in the simulation of groundwater level values using the RMSE statistic

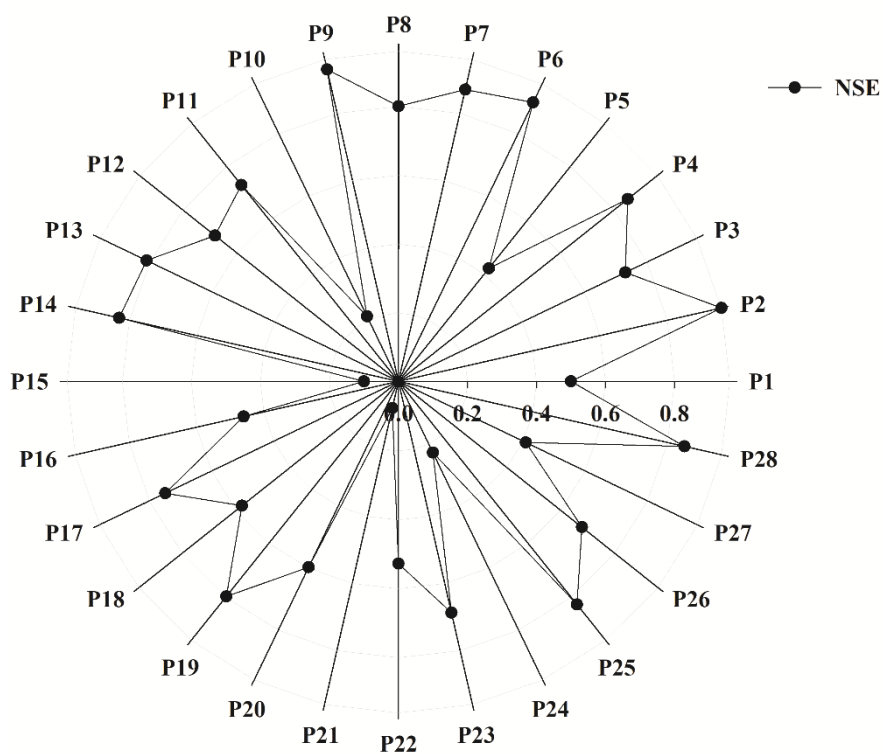


Figure 12. The results of estimating the efficiency of the model in simulating the values of the groundwater level using the NSE statistic

در نهایت با توجه به مقادیر RMSE و NSE حاصل از مدل رگرسیون چندمتغیره در شبیه‌سازی مقادیر کلر، هدایت الکتریکی و سطح آب زیرزمینی، تأثیر متقابل ایستگاه‌ها برآورد شد. در گام بعدی با در اختیار داشتن مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی شده متغیرهای یادشده به برآورد شاخص‌های آنتروپی پرداخته شد.

۴.۳. برآورد شاخص‌های آنتروپی

با اجرای تئوری آنتروپی دو شاخص مهم یعنی انتقال اطلاعات (ITI) و شاخص اطلاعات خالص تبدلی (N(i) در محدوده آبخوان برآورد شد که شاخص اول بیانگر کمبود و یا افزونگی اطلاعات و شاخص دوم بیانگر رتبه هر چه در محدوده آبخوان است. نتایج برآورد مقادیر ITI در محدوده آبخوان به صورت شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) برای پارامترهای کمی و کیفی مورد مطالعه ارائه گردید.

با توجه به شکل (۱۳) می‌توان مشاهده کرد که بخش اعظم منطقه مورد مطالعه از نظر انتقال اطلاعات هدایت الکتریکی در منطقه مورد مطالعه در حالت مازاد و یا نسبتاً مازاد قرار دارد. کمبود ایستگاه فقط در محدوده ایستگاه S28 مشاهده می‌شود که کمبود شدید نمی‌باشد. با توجه به تغییرات مقادیر ITI در منطقه مورد مطالعه می‌توان مشاهده کرد که با وجود تعداد چاه‌ها و هم‌چنین توزیع آن‌ها در محدوده آبخوان به خوبی می‌توان پایش کاملی از نظر شوری با توجه به وضعیت فعلی در منطقه داشت. با توجه به شکل (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که برای پایش دقیق شوری در منطقه مورد مطالعه نیاز به احداث چاه جدید نیست. نواحی زردرنگ نیز در این شکل بیانگر وضعیت نرمال یا متوسط می‌باشند که در نواحی ایستگاه‌های S28 و S9 مشاهده می‌شود. با شرایط فعلی و با توجه به شکل (۱۳)، بیش از ۹۶ درصد منطقه مورد مطالعه از نظر انتقال اطلاعات شوری در محدوده متوسط و بالاتر قرار دارد. این شرایط با توجه به شکل (۱۴) برای مقادیر کلر متفاوت‌تر می‌باشد. براساس شکل (۱۴) نواحی جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه از نظر انتقال اطلاعات کلر در حالت کمبود و نسبتاً کمبود قرار دارد. این موضوع در محدوده ایستگاه S4 نیز مشاهده می‌شود که در حالت "نسبتاً کمبود" قرار گرفته است. از نظر انتقال اطلاعات کلر در منطقه مورد مطالعه می‌توان مشاهده کرد که به غیر از نواحی جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه سایر نواحی انتقال اطلاعات مناسبی داشته و ارتباط بین ایستگاه‌ها حفظ شده است. بر این اساس برای پایش دقیق‌تر و مناسب‌تر بهتر است چندین نمونه از مناطق جنوب‌شرقی نیز اخذ شود. در پژوهش‌های مختلفی (Ramezani et al., 2018; Nazeri tahroudi et al., 2019a; Bagheri et al., 2023; Tabatabaei et al., 2022) توصیه شده است که در مواقع کمبود ایستگاه، به جای حفر ایستگاه جدید، برای پایش دقیق‌تر بهتر است از سایر منابع مانند چاه‌های کشاورزی و شرب استفاده شود.

در مورد انتقال اطلاعات مقادیر سطح آب زیرزمینی با توجه به شکل (۱۵) می‌توان مشاهده کرد که بیش‌تر منطقه مورد مطالعه در حالت متوسط قرار گرفته است. نواحی مرزی منطقه مورد مطالعه به غیر از نواحی جنوب‌غربی از نظر انتقال اطلاعات سطح آب زیرزمینی در حالت نسبتاً مازاد قرار دارد. در محدوده ایستگاه P16 و P10 کمبود نسبی چاه احساس می‌شود، اما این کمبود شدید نمی‌باشد. با شرایط فعلی می‌توان نتیجه گرفت که انتقال اطلاعات خوبی از لحاظ سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان حاکم است که این بدین معنی است که پایش مقادیر سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان با آرایش فعلی ایستگاه‌ها با دقت کافی انجام خواهد شد.

با توجه به شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) می‌توان مشاهده کرد که شرایط آبخوان مورد مطالعه از نظر انتقال اطلاعات شوری و سطح آب زیرزمینی در حالت مناسب قرار گرفته است و پایش صورت گرفته می‌تواند گویای اطلاعات دقیق مقادیر شوری و سطح آب زیرزمینی باشد. در مورد مقادیر کلر نیز به غیر از نواحی جنوب‌شرقی آبخوان، در سایر نواحی

مورد بررسی ارتباط خوبی بین ایستگاه‌ها از نظر تبادل کلر وجود دارد. برای بررسی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود در این مطالعه از شاخص اطلاعات خالص تبدلی استفاده شد.

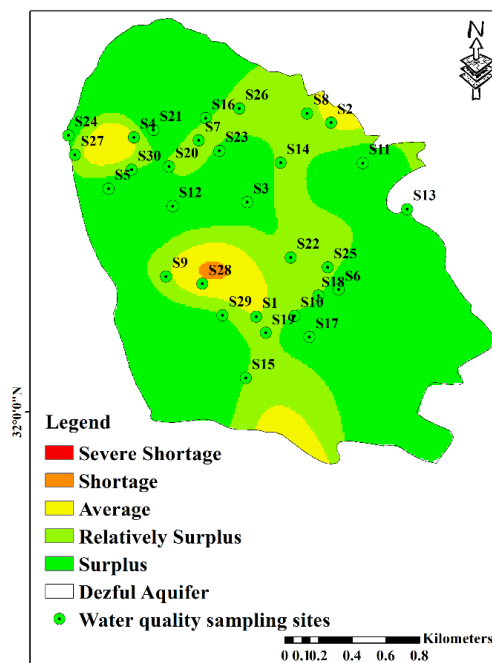


Figure 13. The results of checking the lack or excess of the studied stations in the monitoring of electrical conductivity values

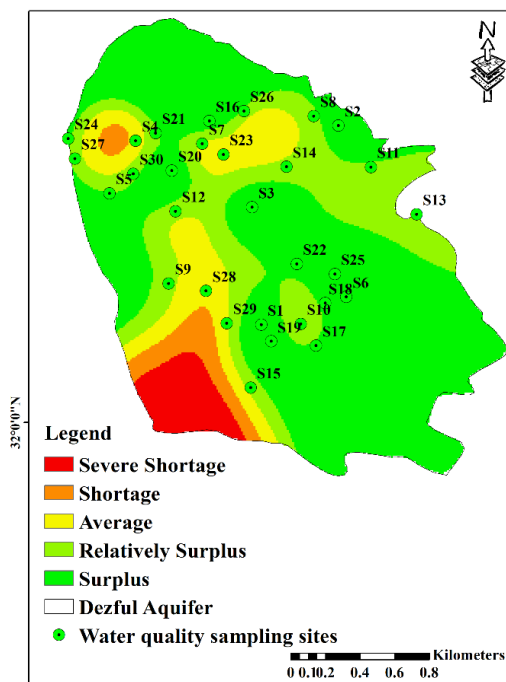


Figure 14. The results of examining the lack or excess of the studied stations in monitoring chlorine values

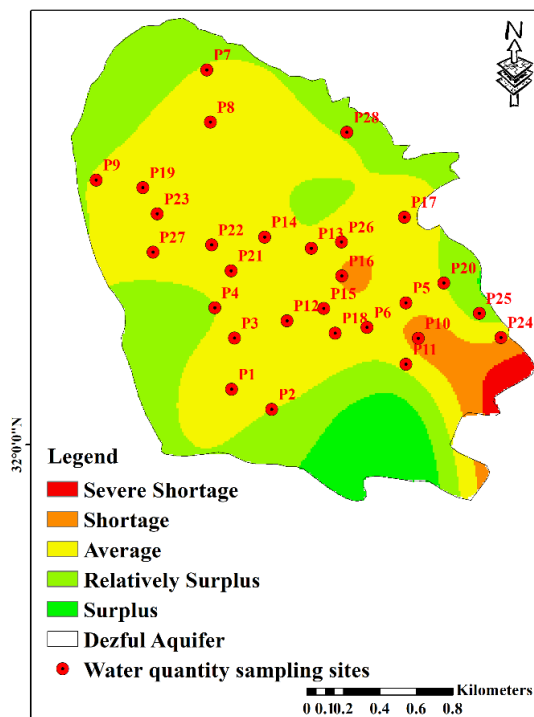


Figure 15. The results of examining the lack or excess of the studied stations in the monitoring of the underground water level

۵.۳. رتبه‌بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه

نتایج رتبه‌بندی چاه‌های مورد مطالعه در محدوده آبخوان به صورت جدول (۱) ارائه شد. با توجه به جدول (۱) می‌توان مشاهده کرد که رتبه‌های اول تا پنجم در مورد مقادیر کلر در آبخوان مورد مطالعه به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های S28، S27، S29، S22 و S26 می‌باشد. در مورد مقادیر هدایت الکتریکی رتبه‌های اول تا پنجم به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های S28، S27، S29، S26 و S9 است. رتبه‌های اول تا سوم در مورد مقادیر کلر و هدایت الکتریکی با توجه به شاخص $N(i)$ در منطقه مورد مطالعه مشابه است. ایستگاه‌های برتر براساس آماره $N(i)$ نشان‌دهنده اهمیت بالای چاه‌ها در آبخوان می‌باشد. این بدان معنی است که ارتباط این چاه‌ها با سایر چاه‌ها بیشتر بوده و بهتر می‌توانند معرف آبخوان از نظر پایش باشند. در واقع هدف اصلی محاسبه شاخص $N(i)$ رتبه‌بندی چاه‌ها از بعد پایش در خصوص ذخیره نیروی کار، وقت و هزینه می‌باشد. با برآورد شاخص یادشده با دقت قابل قبولی می‌توان داده‌های ایستگاه‌هایی که رتبه برتری کسب کرده‌اند را به کل منطقه تعمیم داد. این موضوع در پژوهش *Nazeri et al.* (2019a) و *Tabatabaei et al.* (2022) نیز تأیید شده است. رتبه‌بندی چاه‌های کمی براساس شاخص $N(i)$ نشان داد که ایستگاه‌های P3، P8 و P21 به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را در خصوص انتقال اطلاعات سطح آب زیرزمینی کسب کردند. در مورد چاه‌هایی که کم‌ترین رتبه را کسب کردند، مقادیر آن‌ها باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد.

شاخص آنتروپی اطلاعات ارزشمندی در خصوص پایش شبکه در اختیار پژوهش‌گران قرار می‌دهد. با توجه به شاخص‌های متعدد این تئوری، می‌توان انتقال اطلاعات بین ایستگاه‌ها را برآورد کرده و براساس اطلاعات ارسالی و دریافتی و در نتیجه اطلاعات خالص تبدیلی، ایستگاه‌های مورد مطالعه را رتبه‌بندی کرد. در مواقعی که در اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی و یا مقادیر کیفی یادشده در منطقه مورد مطالعه زمان کافی وجود نداشته باشد و یا بحث هزینه در

اندازه‌گیری مطرح باشد، می‌توان از چاه‌هایی که رتبه بالاتری کسب کرده‌اند، اندازه‌گیری به‌عمل‌آمده و سپس به کل دست‌تعمیم داده شود. زیرا چاه‌های دارای رتبه بالا بیانگر وجود ارتباط بیش‌تر بین ایستگاه‌ها می‌باشد. از این حیث، این شاخص می‌تواند در بحث هزینه و زمان صرفه‌جویی لازم را به‌عمل آورد. از طرفی سایر شاخص‌های موجود نیز می‌توانند در زمینه پایش شبکه کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی مفید باشند. با استفاده از شاخص ITI می‌توان از بُعد مکانی مناطق دارای کمبود چاه را پیدا کرده که در صورت بهینه‌کردن ایستگاه‌ها می‌توان ایستگاه‌های جدیدی احداث کرده و یا از سایر منابع آبی نظیر چاه‌های بهره‌برداری یا چاه‌های کشاورزی استفاده کرد.

Table 1. Ranking results of the studied stations based on the net information transfer index

Quantitative stations	Water level (m)	Qualitative stations	Ranking based on values EC	Ranking based on values CI
			mmho/cm	mg/l
P1	11	S1	27	10
P2	9	S2	7	11
P3	1	S3	10	12
P4	23	S4	26	18
P5	4	S5	11	7
P6	25	S6	12	13
P7	18	S7	13	19
P8	2	S8	20	28
P9	12	S9	5	24
P10	28	S10	24	21
P11	17	S11	15	29
P12	22	S12	25	22
P13	15	S13	15	14
P14	19	S14	21	8
P15	10	S15	22	30
P16	5	S16	18	15
P17	8	S17	19	6
P18	27	S18	9	23
P19	14	S19	30	16
P20	21	S20	28	17
P21	3	S21	16	20
P22	24	S22	6	4
P23	26	S23	29	27
P24	6	S24	17	26
P25	7	S25	8	9
P26	13	S26	4	5
P27	16	S27	2	2
P28	20	S28	1	1
		S29	3	3
		S30	23	25

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی شبکه پایش آب زیرزمینی دشت دزفول در خصوص انتقال اطلاعات کمی و کیفی از آزمون من-کندال اصلاح‌شده و تئوری آنتروپی استفاده شد. مقادیر سطح آب زیرزمینی به‌عنوان مقادیر کمی و مقادیر کلر (میلی‌گرم بر لیتر) و مقادیر هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر) به‌عنوان مقادیر کیفی در بازه ۹۸-۱۳۷۸ در نظر گرفته شد. نتایج بررسی روند تغییرات مقادیر کلر در منطقه مورد مطالعه نشان داد که به‌غیر از شش ایستگاه از بین ۳۰ ایستگاه مورد بررسی که روند تغییرات کاهشی داشته است، در سایر ایستگاه‌ها روند تغییرات مقادیر کلر افزایشی بوده است که این افزایش به‌غیر از نواحی جنوب‌شرقی آبخوان و قسمتی از غرب، در همه نواحی آبخوان قابل مشاهده است. تعداد

ایستگاه‌های دارای روند افزایشی مقادیر هدایت الکتریکی نیز همانند مقادیر کلر می‌باشد که پراکندگی مشابه با مقادیر کلر دارد. روند تغییرات افزایشی مقادیر هدایت الکتریکی در ۳۳ درصد موارد در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. تغییرات سطح آب زیرزمینی در ۵۷ درصد ایستگاه‌ها کاهش و در ۴۳ درصد ایستگاه‌ها افزایشی می‌باشد. نتایج بررسی تغییرات مکانی مقادیر کمی و کیفی در آبخوان مورد مطالعه نشان داد که کاهش حجم سفره سبب افزایش غلظت املاح شده است. جهت اجرای تئوری آنتروپی، بررسی تأثیر متقابل ایستگاه‌ها بر یکدیگر نیاز است که در این مطالعه با استفاده از رگرسیون چندمتغیره برآورد شد. نتایج شبیه‌سازی مقادیر سطح آب زیرزمینی، کلر و هدایت الکتریکی در آبخوان مورد مطالعه میزان خطایی به ترتیب حدود ۰/۱۵ متر، ۰/۰۷ میلی‌گرم بر لیتر و ۸/۷ میکروموس بر سانتی‌متر داشت. نتایج برآورد شاخص‌های آنتروپی نشان داد که براساس انتقال اطلاعات برآورد شده، از نظر افزونگی و یا کمبود ایستگاه در آبخوان مورد مطالعه با توجه به مقادیر سطح آب زیرزمینی، کلر و هدایت الکتریکی به ترتیب در دسته "متوسط"، "نسبتاً مازاد" و "نسبتاً مازاد" قرار گرفته‌اند. در مورد پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی در هیچ موردی کمبود شدید ایستگاه مشاهده نشد و تنها در نواحی جنوب‌غربی آبخوان از جهت پایش کلر و نواحی جنوب‌شرقی آبخوان از جهت پایش سطح آب زیرزمینی کمبود ایستگاه مشاهده می‌شود. این کمبود در منطقه مورد مطالعه شدید نبوده و نیازی به احداث چاه جدید نیست. نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز نشان داد که چاه S28 بهترین چاه از نظر مقادیر کلر و هدایت الکتریکی و چاه P3 بهترین چاه از نظر سطح آب زیرزمینی می‌باشد. این برتری نشان‌دهنده ارتباط مناسب چاه‌های یادشده با سایر چاه‌ها در محدوده آبخوان می‌باشد. با پایش مستمر در آبخوان از نظر بررسی تغییرات زمانی و مکانی و همچنین رتبه‌بندی ایستگاه‌ها و بررسی افزونگی و کمبود ایستگاه در آبخوان می‌توان مدیریت بهینه در خصوص منابع آب زیرزمینی داشته و این مهم نیازمند تکرار مستمر در هر سال می‌باشد.

۵. پی‌نوشت

Information Transfer Index

شاخص انتقال اطلاعات

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Adib, A., & Zamani, R. (2015). Evaluation of the spatial variability of groundwater quality factors in the deful plain using geostatistics methods. *Water Engineering*, 8(27), 1-12. (In Persian).
- Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., Mirabbasi, R., & Kumar, R. (2022). Spatiotemporal analysis of precipitation and temperature concentration using PCI and TCI: a case study of Khuzestan Province, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-18.
- Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., Mirabbasi, R., Khalili, K., & Jhajharia, D. (2018). Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. *Meteorological Applications*, 25(2), 314-321.
- Bageri, F., Khalili, K., & Nazeri Tahroudi, M. (2023). Evaluation of Entropy Theory Based on Random Forest in Quality Monitoring of Ground Water Network. *Water and Irrigation Management*, 13(1), 123-139.
- Burn, D. H., & Elnur, M. A. H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1-4), 107-122.
- Gautam, U., Tiwari, V., & Tripathi, V. K. (2022). Evaluation of groundwater quality of Prayagraj city using entropy water quality index (EWQI) and new integrated water quality index (IWQI). *Sustainable Water Resources Management*, 8(2), 57.

- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Jaynes, E. T. (1957). Information theory and statistical mechanics. *Physical review*, 106(4), 620.
- Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Measures; Charles Griffin Book Series.
- Khalili, K., Tahoudi, M. N., Mirabbasi, R., & Ahmadi, F. (2016). Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(4), 1205-1221.
- Khalili, M. N., Ouarda, T. B., & Gachon, P. (2009). Identification of temporal trends in annual and seasonal low flows occurring in Canadian rivers: The effect of short-and long-term persistence. *Journal of Hydrology*, 369(1-2), 183-197.
- Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., & Thurner, K. (2009). Streamflow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 171-183.
- Luo, Y., Liu, S., Fu, S., Liu, J., Wang, G., & Zhou, G. (2008). Trends of precipitation in Beijiing River basin, Guangdong province, China. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(13), 2377-2386.
- Mann, H. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometria*, 13, MathSci Net, pp. 245-259.
- Mogheir, Y., & Singh, V. P. (2002). Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. *Water Resources Management*, 16, 37-49.
- Mogheir, Y., De Lima, J. L. M. P., & Singh, V. P. (2009). Entropy and multi-objective based approach for groundwater quality monitoring network assessment and redesign. *Water resources management*, 23, 1603-1620.
- Nazeri Tahroudi, M., Khashei Siuki, A., & Ramezani, Y. (2019a). Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-17.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., & Ahmadi, F. (2019b). Investigating the trend and time of precipitation and river flow rate changes in Lake Urmia basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(6), 1-13.
- Ramezani, Y., Pourreza-Bilondi, M., Yaghoobzadeh, M., & Nazeri Tahroudi, M. (2018). Qualitative Monitoring of Drinking Water Using Entropy Indices (Case Study: Central Aquifer of Birjand Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(3), 556-568.
- Rostami, F., Attarod, P., Keshtkar, H., & Nazeri Tahroudi, M. (2022). Impact of climatic parameters on the extent of mangrove forests of southern Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 20(4), 671-682.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423.
- Tabatabaei, S. M., Dastourani, M., Eslamian, S., & Nazeri Tahroudi, M. (2022). Ranking and optimizing the rain-gauge networks using the entropy-copula approach (Case study of the Siminehrood Basin, Iran). *Applied Water Science*, 12(9), 214.
- Tahroudi, M. N., Siuki, A. K., & Ramezani, Y. (2019). Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory. *Environmental monitoring and assessment*, 191(4), 1-17.
- Taj, M., Drikvand, E., & Razaz, M. (2018). Evaluation of groundwater water quality based on natural parameters of land layers (EC, DO, TH, PH) case study: Dezful plain (IRAN). *Journal of Water Science & Engineering*, 8(22), 81-67. (In Persian).
- Thiel, H. (1950, February). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. In Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A (Vol. 53, pp. 1397-1412).