

## رتبه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت سراب برای مصارف شرب با استفاده از روش انتروپی

اصغر اصغری مقدم<sup>۱\*</sup>، میثم ودیعی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۰۱

<sup>۱</sup>استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup>دانشجوی دوره دکتری، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [Moghaddam@tabrizu.ac.ir](mailto:Moghaddam@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

روش‌های جدید ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی طی سال‌های اخیر توسعه زیادی یافته است. در پژوهش حاضر، کاربرد نظریه انتروپی برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب نشان داده شده است. در مناطق روستایی مهم‌ترین منبع آب شرب، منابع آب زیرزمینی است. اغلب آب شرب دشت سراب نیز از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. به‌منظور جلوگیری از قضاوت‌های فردی در تعیین وزن پارامترهای مورد استفاده در روش شاخص کیفیت آب، از روش انتروپی استفاده شد. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی کیفیت آب شرب دشت سراب با استفاده از انتروپی وزن‌دار، ۱۲ پارامتر مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی شامل بی‌کربنات، سولفات، کلراید، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، لیتیم، فلوراید، نیتрат، سیلیس و هدایت الکتریکی استفاده شد. نتایج نشان داد، کلرور دارای بالاترین نرخ تأثیرگذاری بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان‌های دشت سراب بوده است. پتاسیم، منیزیم و نیترات پایدارترین پارامترها، از میان پارامترهای مورد مطالعه هستند. نتایج نشان داد، ۵۳ درصد و ۱۸ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی به‌ترتیب در گروه یک و دو طبقه‌بندی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تحولات هیدروشیمیایی، کیفیت آب شرب، منابع آب، نمودار شولر، وزن انتروپی

## Groundwater Quality Ranking of Sarab Plain for Drinking Purpose Using Entropy Method

A Asghari Moghaddam\*<sup>1</sup>, M Vadiati<sup>2</sup>

Received: 24 January 2015 Accepted: 21 June 2016

<sup>1</sup>- Prof., Earth Sci. Dept., Faculty of Natural Sci., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2</sup>- PhD. Student, Earth Sci. Dept., Faculty of Natural Sci., Univ. of Tabriz, Iran

\* Corresponding Author, Email: Moghaddam@tabrizu.ac.ir

### Abstract

In recent years, the new methods for assessment of groundwater resources quality have been developed extensively. In this research, the application of Entropy Theory to evaluate groundwater quality for drinking purposes is shown. In rural regions, the groundwater resources are the main source of drinking water. Also, the source of drinking water in Sarab plain is groundwater resources. The Entropy method was used, in order to prevent the individual judgments on determination weight of the parameters used in Water Quality Index Method. In this study, for evaluating Sarab Plain groundwater quality for drinking purposes through entropy weighted method, 12 groundwater parameters affecting the quality of drinking water, including bicarbonate, sulphate, chloride, calcium, magnesium, sodium, potassium, lithium, fluoride, nitrate, silicates and electrical conductivity, were used. Results showed that chloride had the highest impact on water quality of Sarab plain aquifers. Potassium, sodium and nitrate are the most unstable parameters among the studied parameters. The results showed 53 and 18 percent of groundwater samples were classified in group one and two respectively.

**Keywords:** Drinking water quality, Entropy weight, Hydrochemical evolution, Schoeller diagram, Water resources

### مقدمه

امروزه در تمام نقاط دنیا منابع آب سطحی و زیرزمینی نقش بسیار مهم و تعیین کننده‌ای در توسعه اقتصادی، اجتماعی و همچنین کیفیت زندگی ایفا می‌کنند. رشد جمعیت و افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و همچنین توسعه مناطق صنعتی در نقاط مختلف، موجب افت سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت منابع مورد استفاده برای کشاورزی و شرب شده است. سلامت و بهداشت زندگی انسان در ارتباط نزدیک با

کیفیت آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب مصرفی در بسیاری از نقاط دنیا و به‌خصوص کشورمان است.

کیفیت آب زیرزمینی به‌دلیل عوامل مختلفی همچون ورود فاضلاب، ورود کودهای شیمیایی، نشت از شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی و پساب‌ها در معرض کاهش و تخریب قرار می‌گیرند. همچنین شرایط هیدروژئولوژیکی و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان باعث تغییر کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مختلف

حاد خونی در کودکان و کاهش توانایی انتقال اکسیژن توسط رگ‌ها می‌شود (کمپلی ۱۹۴۵). با اندازه‌گیری مقادیر هدایت الکتریکی که رابطه مستقیمی با مقدار مجموع نمک‌های محلول در آب دارد، می‌توان به‌طور نسبی آلودگی معدنی آب را مشخص ساخت. کل املاح محلول نقش مستقیمی در ایجاد خطرات بهداشتی ندارد، اما زمینه‌ساز ایجاد سنگ کلیه در انسان است. همچنین غلظت بالای کل املاح محلول می‌تواند باعث ایجاد سوزش معده و روده انسان شود (سازمان بهداشت جهانی ۲۰۰۸).

سازمان بهداشت جهانی به‌عنوان بالاترین نهاد بین‌المللی در کنترل کیفیت آب رهنمودهایی برای آلاینده‌های مختلف آب آشامیدنی ارائه کرده است. هدف اصلی تدوین رهنمودهای کیفی برای آب آشامیدنی، حفظ بهداشت عمومی است. مواد شیمیایی که در تعیین مقادیر رهنمودی انتخاب می‌شود، بالقوه برای سلامتی انسان خطرناک است. با استفاده از روش شاخص کیفی آب<sup>۴</sup> (*WQI*) می‌توان از بیان عددی برای مشخص کردن کیفیت آب استفاده کرد. با توجه به توانایی بالای آن در توصیف اطلاعات کیفیت آب و همچنین استفاده از پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی و مدیریت کیفیت آب زیرزمینی، روش‌های مبتنی بر شاخص کیفی آب در بسیاری از نقاط جهان مورد توجه و استفاده قرار گرفته است (سیموز و همکاران ۲۰۰۸).

در زمینه کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی مطالعات متنوعی انجام شده است. ایشاکو (۲۰۱۱) با استفاده از شاخص *WQI* کیفیت آب زیرزمینی شمال شرق نیجریه را بررسی کرد. نتایج نشان داد در فصل تر و خشک مقدار شاخص *WQI* تغییر می‌کند. در مطالعه دیگری سامانی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی شاخص *WQI* در منابع آب زیرزمینی دشت

می‌شود. از این‌رو کیفیت آب زیرزمینی متأثر از شرایط زیست‌محیطی و هیدروژئولوژیکی حاکم بر آبخوان دشت سراب است.

روش‌های گوناگونی برای ارزیابی کیفیت آب توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال می‌توان به روش‌های منطق فازی<sup>۱</sup> (نخعی و ودیعی ۱۳۹۱ الف)، تحلیل عاملی<sup>۲</sup> (جلالی و اصغری مقدم ۱۳۹۲)، مدل‌سازی خاکستری (ایپ و همکاران ۲۰۰۹) و تحلیل سلسله مراتبی تحلیلی<sup>۳</sup> (نخعی و ودیعی ۱۳۹۱ ب) اشاره کرد. این روش‌ها اغلب به‌صورت کیفی هستند و قابلیت توصیف دقیق کیفیت آب را ندارند. در این پژوهش تلاش خواهد شد تا با استفاده از روش شاخص انتروپی وزن‌دار در محیط نرم‌افزار مایکروسافت اکسل<sup>۴</sup>، رتبه کیفیت آب زیرزمینی تعیین گردد.

آب شرب، آبی است عاری از موجودات بیماری‌زا که ترکیبات سمی یا دارای اثرات دراز مدت خطرناک بر سلامتی انسان در آن ناچیز است. با عبور آب از لایه‌های مختلف خاک و سازندهای موجود در مسیر حرکت آب از بالادست به پایین‌دست و فاصله گرفتن از منطقه تغذیه و نزدیک شدن به محل تخلیه، کیفیت آب زیرزمینی کاهش می‌یابد (تاد و میز ۲۰۰۵). انحلال کانی‌های سازنده ساختمان خاک که در مسیر حرکت آب زیرزمینی قرار دارند، موجب می‌شود کیفیت آب زیرزمینی تغییر کند. آب‌هایی که مقدار کلرور آن‌ها بیش از حد است، شور و آب‌هایی که مقدار سولفات سدیم و سولفات منیزیم آن‌ها زیاد است، گس و تلخ مزه‌اند. کلسیم و منیزیم نیز از مهم‌ترین عناصر مورد نیاز بدن هستند. املاح این دو فلز موجب سختی آب می‌شود (لاله‌زاری و طباطبایی ۱۳۸۹). همچنین مقادیر بالای نیترات در آب زیرزمینی منجر به بروز نارسایی

<sup>4</sup> Microsoft Excel

<sup>5</sup> Water quality index method

<sup>1</sup> Fuzzy logic

<sup>2</sup> Factor analysis method

<sup>3</sup> Analytic hierarchy process method

جنس آندزیت، لاتیت، ایگنیمبریت و بازالت هستند. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی در دشت سراب مربوط به تغذیه دشت، ناشی از نزولات جوی، جریان‌های زیرزمینی، سیلاب‌ها و آب‌های برگشتی کشاورزی بوده که سبب بالا آمدن سطح آب زیرزمینی می‌شود و تخلیه آب زیرزمینی دشت به دلیل بهره‌برداری از چاه‌ها، تخلیه قنوات و چشمه‌هاست که سبب پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در سفره می‌گردد. بنابراین تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه چشمگیر است و در نتیجه کیفیت آب زیرزمینی نیز در طول سال تغییرات زیادی دارد.

در این پژوهش، از میان متغیرهای اندازه‌گیری شده ۴۹ نمونه منابع آب زیرزمینی که در خردادماه ۱۳۹۳ از دشت سراب نمونه‌گیری شده بودند، متغیرهای بی‌کربنات ( $\text{HCO}_3$ )، سولفات ( $\text{SO}_4$ )، کلراید (Cl)، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na)، پتاسیم (K)، لیتیم (Li)، فلوراید (F)، نترات ( $\text{NO}_3$ )، سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) و هدایت الکتریکی (EC) که در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز آنالیز شده بودند، استفاده شده است. خطای موازنه بار یونی داده‌ها نیز کمتر از ۵٪ است که برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی مناسب است.

ابتدا، از تحلیل توصیفی خصوصیات آماری پارامترهای هیدروشیمیایی استفاده شد تا بتوان به درک درستی از شرایط هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی آبخوان دست یافت. پس از بررسی‌های مذکور، با استفاده از انتروپی وزن‌دار شاخص کیفیت آب زیرزمینی (EWQI) به تحلیل کیفیت آب زیرزمینی دشت سراب پرداخته شده است.

مرودمشت پرداختند و از سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌منظور بررسی مکانی مقدار شاخص WQI بهره بردند. در زمینه شاخص انتروپی وزن‌دار نیز می‌توان به مطالعات متعددی اشاره کرد. پی‌یو و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه پنگیانگ کشور چین با استفاده از انتروپی وزن‌دار شاخص کیفیت آب<sup>۱</sup> (EWWQI) پرداختند. نتایج نشان داد این روش در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از کارایی بالایی برخوردار است.

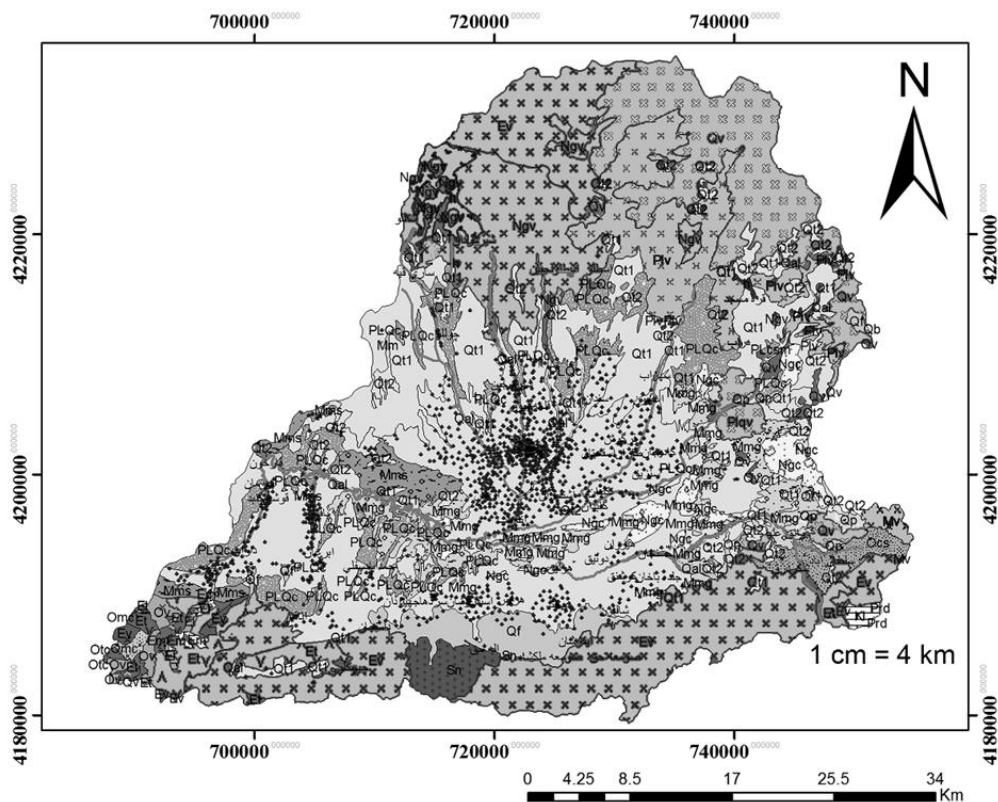
در محاسبات WQI وزن هر پارامتر توسط کارشناس خبره تعیین می‌شود و به این طریق بسیاری از اطلاعات ارزشمند کیفیت آب زیرزمینی بدون استفاده قرار می‌گیرد. از این رو در این مطالعه، تلاش شده است تا با استفاده از روش انتروپی وزن‌دار و رابطه وزن انتروپی<sup>۲</sup> حداکثر بهره را از شاخص کیفیت آب برده و پارامترهایی با بالاترین نرخ تأثیرگذاری بر کیفیت آب زیرزمینی و با بیشترین ناپایداری و تغییرات تعیین گردد.

## مواد و روش‌ها

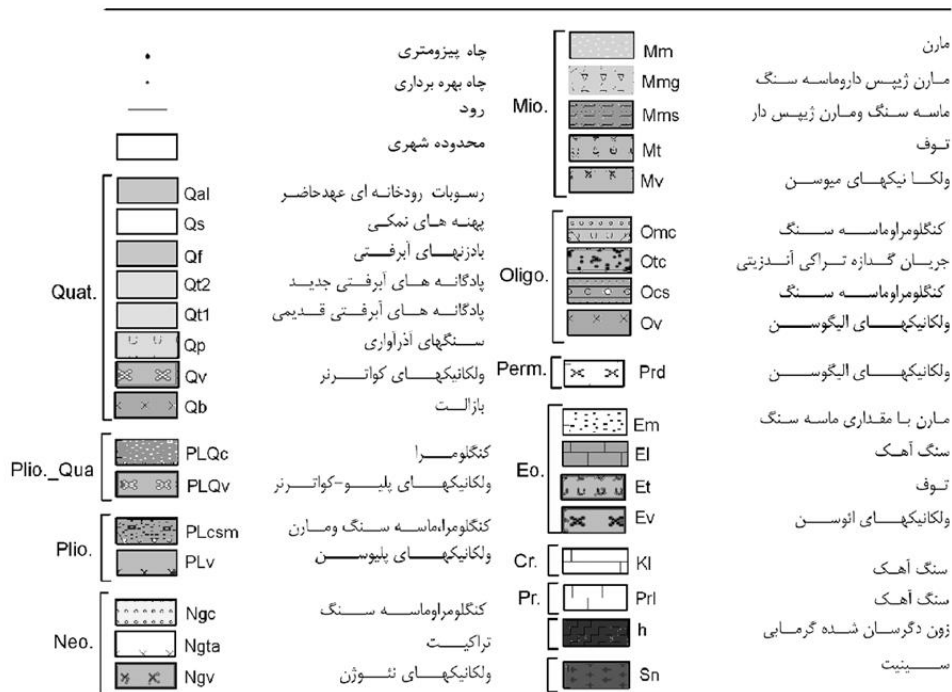
منطقه مورد مطالعه دشت سراب است که در حوضه آبریز ارومیه با وسعتی حدود ۴۲۰ کیلومترمربع و در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شرق شهرستان تبریز واقع شده است. دشت سراب امتداد شرقی-غربی داشته و می‌توان نسبت به ارتفاعات شمالی و جنوبی به‌صورت فروافتادگی در نظر گرفت که به‌وسیله کوه‌های بزقوش در جنوب و کوه‌های آغلان داغ و سبلان در شمال احاطه شده است. عمده سنگ‌های تشکیل‌دهنده قسمت شمالی و جنوبی منطقه مورد مطالعه سنگ‌هایی با سن ائوسن از

<sup>2</sup> Entropy weight

<sup>1</sup> Entropy weighted water quality index



راهنمای زمین‌شناسی



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور).

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad [4]$$

نسبت مقدار شاخص پارامتر زرد نمونه  $i$  بر اساس معادله زیر محاسبه شده است:

$$P_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad [5]$$

انتروپی اطلاعات نیز به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad [6]$$

هرچه مقدار انتروپی کمتر باشد؛ تأثیر پارامتر  $j$  بیشتر خواهد بود. وزن انتروپی ( $\omega_j$ ) هر پارامتر ( $j$ ) با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است:

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad [7]$$

مرحله دوم محاسبه میزان EWQI، تعیین معیار رتبه بندی<sup>۵</sup> کیفی ( $q_j$ ) برای هر پارامتر است. معیار رتبه بندی کیفی نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad [8]$$

$C_j$  و  $S_j$  به ترتیب غلظت پارامتر شیمیایی برای هر نمونه و غلظت همان پارامتر بر اساس رهنمودهای کیفیت آب برای مصارف شرب برحسب  $mg/l$  است. در این پژوهش از استاندارد سازمان بهداشت جهانی استفاده شده است. مرحله پایانی محاسبه EWQI به صورت زیر خواهد بود.

$$EWQI = \sum_{j=1}^n \omega_j q_j \quad [9]$$

بر اساس تقسیم بندی پی یو و همکاران (۲۰۱۰)، کیفیت آب زیرزمینی بر اساس EWQI برای مصارف شرب در ۵ رده قرار می گیرد (جدول ۱).

مفهوم انتروپی اولین بار توسط شانون<sup>۱</sup> (۱۹۴۸) ارائه شد. مفهوم اساسی انتروپی این است که یک رخداد اتفاقی تا چه حد تصادفی است. در واقع میزان تصادفی بودن را به صورت یک معیار ریاضی گزارش می کند (گوی شین و همکاران ۲۰۱۱). محاسبه EWQI در سه مرحله شامل محاسبه وزن انتروپی، محاسبه معیار رتبه بندی کیفی و تعیین رده بندی کیفیت آب انجام می شود. در مرحله نخست باید وزن انتروپی هر پارامتر را محاسبه کرد. مراحل محاسبه انتروپی، وزن انتروپی و EWQI بدین صورت است. براساس داده های کیفیت آب زیرزمینی برای  $m$  نمونه و  $n$  پارامتر ماتریس مقادیر ویژه  $X^2$  به صورت زیر خواهد بود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad [1]$$

با توجه به اینکه پارامترهای کیفی آب زیرزمینی، واحدهای مختلفی دارند و همچنین اختلاف کیفیت نمونه ها، با استفاده از تابع نرمال سازی، آماده سازی می شوند؛ چهار نوع و حالت را بر اساس خصوصیات هر شاخص می توان از هم تفکیک کرد که شامل نوع کارایی<sup>۲</sup>، نوع هزینه ای<sup>۳</sup>، نوع ثابت شده<sup>۴</sup> و نوع بازه ای<sup>۱</sup> است. برای نوع کارایی، تابع نرمال سازی به صورت زیر خواهد بود (وو و همکاران ۲۰۱۱):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{min}}{(x_{ij})_{max} - (x_{ij})_{min}} \quad [2]$$

و این در حالی است که برای نوع هزینه ای، تابع نرمال سازی داده ها به صورت رابطه زیر است:

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{max} - (x_{ij})_{min}} \quad [3]$$

ماتریس استاندارد داده های خام پس از نرمال سازی بدین صورت خواهد شد:

<sup>5</sup> Fixed type

<sup>6</sup> Interval type

<sup>7</sup> Rating scale

<sup>1</sup> Shannon

<sup>2</sup> Eigenvalue

<sup>3</sup> Efficiency type

<sup>4</sup> Cost type

جدول ۱- رتبه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس EWQI برای مصارف شرب.

مقدار شاخص	رتبه	کیفیت آب
کمتر از ۵۰	۱	بسیار خوب
۵۰ تا ۱۰۰	۲	خوب
۱۰۰ تا ۱۵۰	۳	متوسط
۱۵۰ تا ۲۰۰	۴	بد
بیشتر از ۲۰۰	۵	بسیار بد

## نتایج و بحث

در این پژوهش، ویژگی‌های آماری متغیرهای مورد استفاده از میان متغیرهای اندازه‌گیری شده در ۴۹ نمونه منابع آب زیرزمینی دشت سراب، پرداخته شد. خطای موازنه بار یونی داده‌ها کمتر از ۵٪ است که نشان می‌دهد برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی مناسب است. در جدول ۲ خصوصیات آماری ۴۹ نمونه استفاده شده به همراه استاندارد WHO برای آب شرب ارائه شده است.

جدول ۲- خلاصه آماری به همراه استاندارد WHO برای هر پارامتر.

هدایت الکتریکی	بی‌کربنات	کلسیم	منیزیم	کلرور	سدیم	پتاسیم	لیتیم	سولفات	فلوئور	نیترات	سیلیس	بیشینه
۳۴۰۰	۸۵۴	۳۸۴	۸۰/۲	۵۱۰	۶۶۶	۶۶	۱/۳۸	۷۵۸	۰/۷۵	۱۷۴	۲۵۲	بیشینه
۱۸۵	۹۱/۵	۲۲	۳/۶	۰	۲/۲۹	۰	۰	۴/۸	۰	۰	۱۷	کمیته
۹۵۲/۷	۲۷۰	۱۰۶/۸	۲۵/۳	۱۸۱	۱۴۳	۶/۶	۰/۱	۱۴۸	۰/۲	۱۲/۶	۵۵/۴	میانگین
۷۵۰	۱۲۶	۷۴	۱۸/۲	۶۸۵	۴۷۸	۱۰/۷	۰/۳	۱۶۴/۶	۰/۲	۲۵/۶	۵۹	انحراف معیار
۱۵۰۰	۱۵۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۲	۰/۵	۲۵۰	۱/۵	۵۰	۵۰	استاندارد WHO

(تمامی واحدها برحسب میلی‌گرم بر لیتر است به جز هدایت الکتریکی که برحسب میکروموس بر سانتی‌متر است).

بزرگ‌تر از ۰/۷ باشد، همبستگی بسیار قوی بین دو پارامتر مورد مقایسه برقرار است و همین‌طور، ضریب همبستگی بین ۰/۵ تا ۰/۷ و در سطح معنی‌داری  $p < 0/05$  همبستگی متوسطی دارند (گوی شین و همکاران ۲۰۱۱). مقدار ضریب همبستگی کمتر از ۰/۳ به‌عنوان عدم همبستگی بین پارامترها تلقی شده است. نتایج تحلیل ضرایب همبستگی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد همبستگی مثبت قوی بین هدایت الکتریکی با سولفات ( $r=0/86$ ) و همچنین با کلسیم ( $r=0/84$ ) وجود دارد.

همان‌طوری که در جدول ۲ آمده است؛ مقدار میانگین تمامی پارامترها به جز بی‌کربنات پایین‌تر از مقدار مجاز استاندارد WHO برای آب شرب است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و تغذیه آبخوان از سازندهای سخت سبلان و بزقوش می‌توان انتظار داشت که غلظت یون بی‌کربنات در آب زیرزمینی افزایش یابد.

برای بهتر مشخص شدن رابطه تغییرات بین پارامترهای مختلف به تحلیل ضرایب همبستگی پارامترهای هیدروشیمیایی مورد استفاده در پژوهش حاضر پرداخته شد. در حالتی که ضریب همبستگی ( $r$ )

جدول ۳- ضرایب همبستگی پارامترهای هیدروشیمیایی.

SiO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	F	SO <sub>4</sub>	Li	K	Na	Cl	Mg	Ca	HCO <sub>3</sub>	EC
										۱	EC
										۰/۶۴	HCO <sub>3</sub>
									۱	۰/۳۵	Ca
								۱	۰/۷۴	۰/۳۱	Mg
							۱	۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۱۲	Cl
						۱	۰/۹۹	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۱۹	Na
					۱	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۳۲	۰/۷	K
				۱	۰/۸۴	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۶۱	Li
			۱	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۶۸	۰/۹۴	۰/۲۷	SO <sub>4</sub>
		۱	۰/۳۴	۰/۱	۰/۱۷	۰/۵۸	۰/۴۳	۰/۲۳	۰/۳	۰/۲۵	F
	۱	۰/۱۷	۰/۶۱	۰/۲۷	۰/۳۶	-۰/۰۰۵	۰/۲	۰/۴۶	۰/۶۳	۰/۱۵	NO <sub>3</sub>
۱	۰/۳	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۶۷	-۰/۳۷	-۰/۱	-۰/۳۹	۰/۱۵	۰/۲۷	SiO <sub>2</sub>

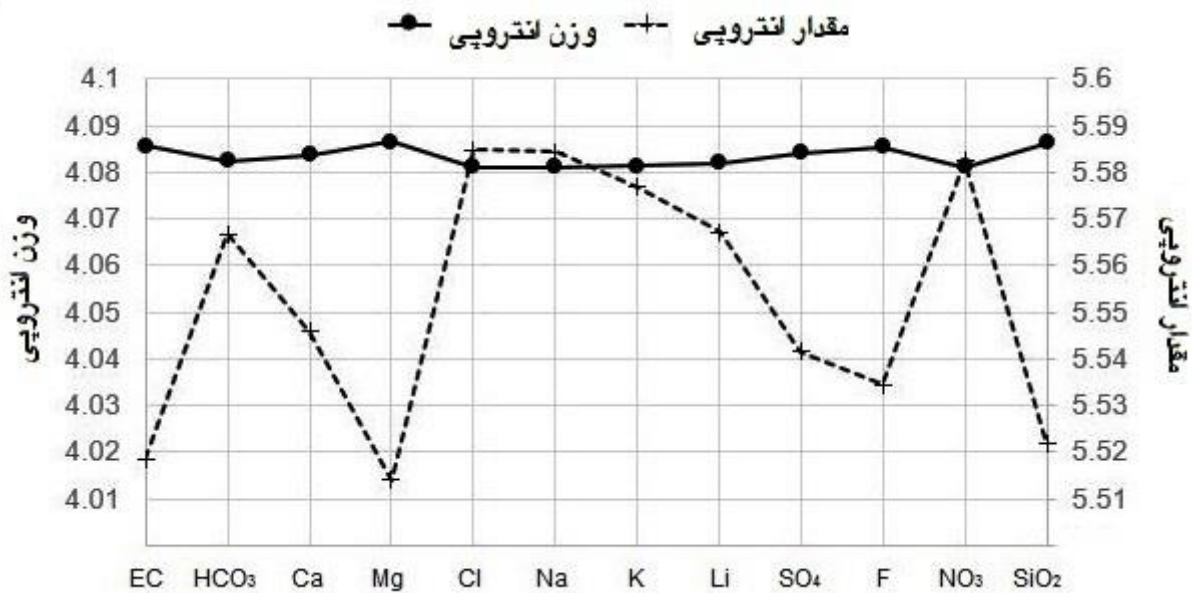
محاسبه شدند. سپس معیار رتبه‌بندی کیفی آب براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی تعیین شد و در نهایت با ضرب کردن این مقدار در وزن انترویی برای هر پارامتر و جمع این مقادیر برای هر نمونه، مقدار EWQI تعیین گردید. در شکل ۲، نتایج مربوط به محاسبه مقدار انترویی و وزن انترویی برای ۱۲ پارامتر مورد بررسی آورده شده است. مقادیر بالای انترویی نشان از تأثیرگذاری زیاد یک پارامتر نسبت به سایر پارامترها است (وو و همکاران ۲۰۱۱). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کلرور بالاترین نرخ تأثیرگذاری را بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه دارد. پس از آن به- ترتیب سدیم، نترات، پتاسیم، لیتیم، بی‌کربنات، کلسیم، سولفات، فلئور، هدایت الکتریکی، سیلیس و منیزیم قرار دارند و بنابراین عامل اصلی کاهش کیفیت آب کلرور در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ مقدار انترویی و وزن انترویی پارامترهای مورد استفاده در محدوده مطالعاتی دشت سراب و برای مصارف شرب آمده است.

همچنین هدایت الکتریکی همبستگی متوسط با بی‌کربنات ( $r=0/64$ ) و منیزیم ( $r=0/65$ ) دارد. از این‌رو بیشترین تأثیرپذیری هدایت الکتریکی از کلسیم و سولفات است. همچنین می‌توان به همبستگی متوسط فلئور با سدیم ( $r=0/58$ )، همبستگی بالای سولفات با کلسیم ( $r=0/94$ )، لیتیم با پتاسیم ( $r=0/84$ ) و منیزیم با کلسیم ( $r=0/74$ ) اشاره کرد.

با توجه به نتایج ضرایب همبستگی منشأ اکثر تغییرات پارامترهای هیدروشیمیایی منطقه مورد مطالعه عوامل زمین‌شناسی و محیطی است. وجود رسوبات مارنی و تبخیری در بخش غربی و مرکزی منطقه و همچنین نقش تغذیه‌کنندگی سازندهای سخت منطقه شمالی و جنوبی آبخوان باعث تغییرات بالای کیفیت آب زیرزمینی در منطقه شده است.

پس از بررسی‌های اولیه، با استفاده از روابط ۲ تا ۹، میزان EWQI و رتبه هر نمونه آب برای مصرف شرب اندازه‌گیری شدند. در معادله ۶ مقدار انترویی و رابطه ۷ وزن انترویی برای هر پارامتر





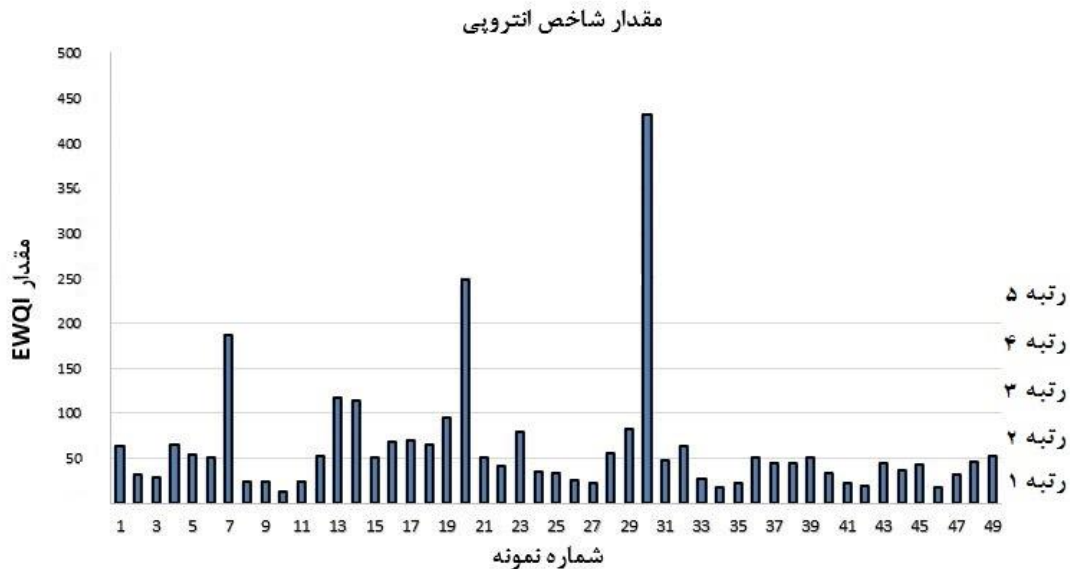
شکل ۲- مقدار انتروپی و وزن انتروپی پارامترهای مورد استفاده.

تغییرات پایدار و یکنواختی در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه دارد.

درنهایت پس از محاسبه مقدار انتروپی و وزن انتروپی، *EWQI* کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی تهیه شد. نتایج برای تمامی ۴۹ نمونه آب زیرزمینی مورد مطالعه در شکل ۳ آمده است.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است؛ اغلب نمونه‌های آب زیرزمینی در رتبه یک و پس از آن در رتبه دو قرار گرفته‌اند؛ بنابراین نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در اغلب چاه‌های منطقه مورد مطالعه در کلاس خوب و بسیار خوب قرار دارد. در جدول ۴ نیز مقدار *EWQI* و رتبه کیفی هریک نمونه‌های آب زیرزمینی از نظر شرب و براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی آورده شده است.

مقدار وزن انتروپی نشان دهنده پایدار بودن کیفیت آب زیرزمینی از نظر پارامتر مورد نظر است. مقادیر وزن انتروپی کمتر نشان‌دهنده تغییرات کیفیتی آب زیرزمینی است (گوی شین و همکاران ۲۰۱۱). به عبارت دیگر اگر وزن انتروپی پارامتری پایین باشد، تغییرات کیفیت آن زیاد بوده و در محیط آبخوان ناپایدار است و برعکس پارامتری با وزن انتروپی بالا تغییرات کمی داشته و در محیط آبخوان به پایداری رسیده است. بنابراین سدیم، پتاسیم و نیترات دارای بیشترین ناپایداری و تغییرات مداوم است و سدیم و پتاسیم به دلیل ورود فصلی تغذیه آبخوان از هوازدگی سازندهای سخت منطقه و نیترات به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری در منطقه مورد مطالعه باعث بروز تأثیرات زیست‌محیطی بر کیفیت آب زیرزمینی خواهد شد. بیشترین وزن انتروپی نیز مربوط به منیزیم است که



شکل ۳- نتایج ارزیابی مقدار EWQI برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه.

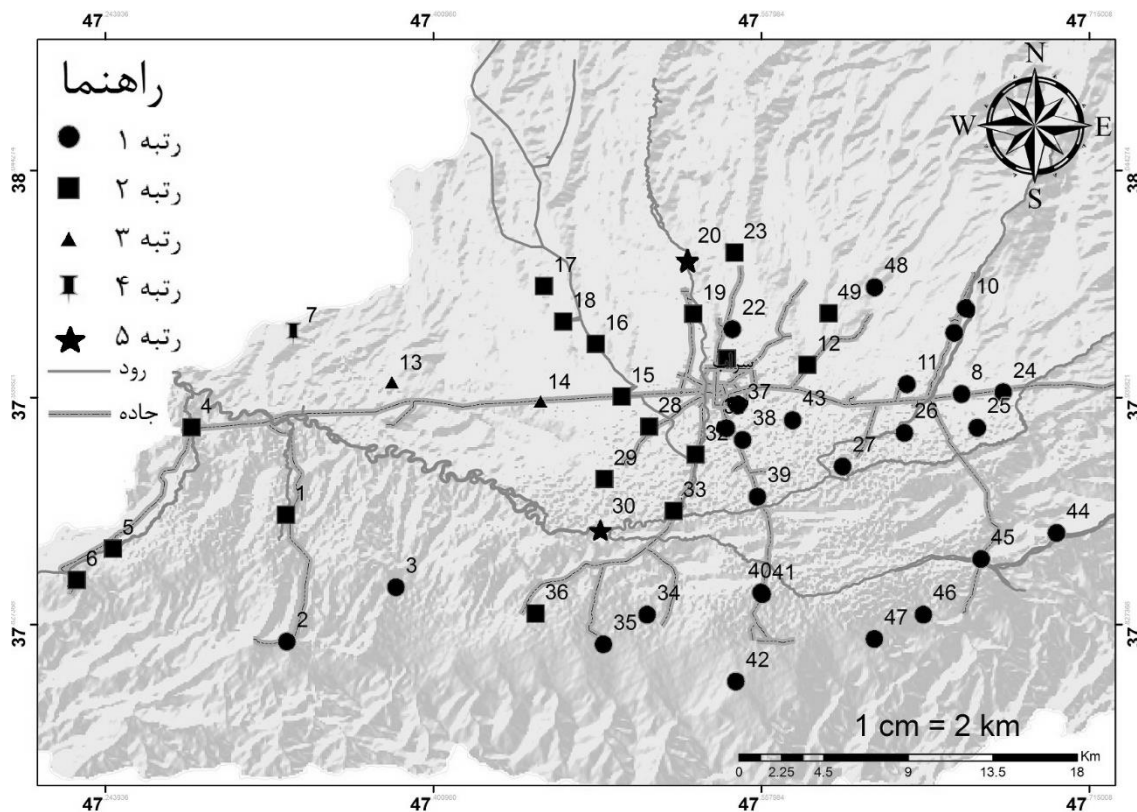
جدول ۴- EWQI و رتبه کیفی تمامی نمونه‌های آب زیرزمینی از نظر شرب.

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
رتبه	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۳	۲	۲
نمونه	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴
رتبه	۲	۲	۵	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۵	۱	۲	۲	۱
نمونه	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰	۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹		
رتبه	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲		

زیرزمینی و در نتیجه رتبه بالا و کیفیت پایین نمونه مورد نظر شده است.

نمونه ۲۰ نیز یکی دیگر از نمونه‌هایی است که در رتبه ۵ قرار گرفته و در رده بسیار بد است. این نمونه مربوط به دامنه‌های جنوبی سبلان و چاه‌های گرمابی است. ویژگی گرمابی بودن این نمونه آب زیرزمینی موجب بروز آنومالی در مقادیر پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه مذکور شده است. به جهت درک بهتر مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، موقعیت نمونه‌ها و رتبه‌های کیفیت آب زیرزمینی تعیین شده در شکل ۴ نمایش داده شده است.

به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد؛ نمونه‌هایی که دارای رتبه بالایی هستند؛ به عبارت دیگر مقدار *EWQI* بالایی دارند، در نزدیکی تلخه‌رود قرار گرفته‌اند. تلخه‌رود با عبور از رسوبات رسی و مارنی سازند قم و گنبد‌های نمکی باعث تخریب کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه شده است. نمونه ۳۰ به دلیل نزدیکی به رودخانه تلخه‌رود، رتبه ۵ گرفته است. نمونه ۷ که رتبه ۴ گرفته است از نظر کیفیت آب در رده بد قرار می‌گیرد. نمونه ۷ در بخش غربی و خروجی دشت قرار دارد و در مجاورت آن سازندهای رسی و مارنی قرار گرفته‌اند که گسترش عمقی سازندهای مذکور باعث کاهش کیفیت آب

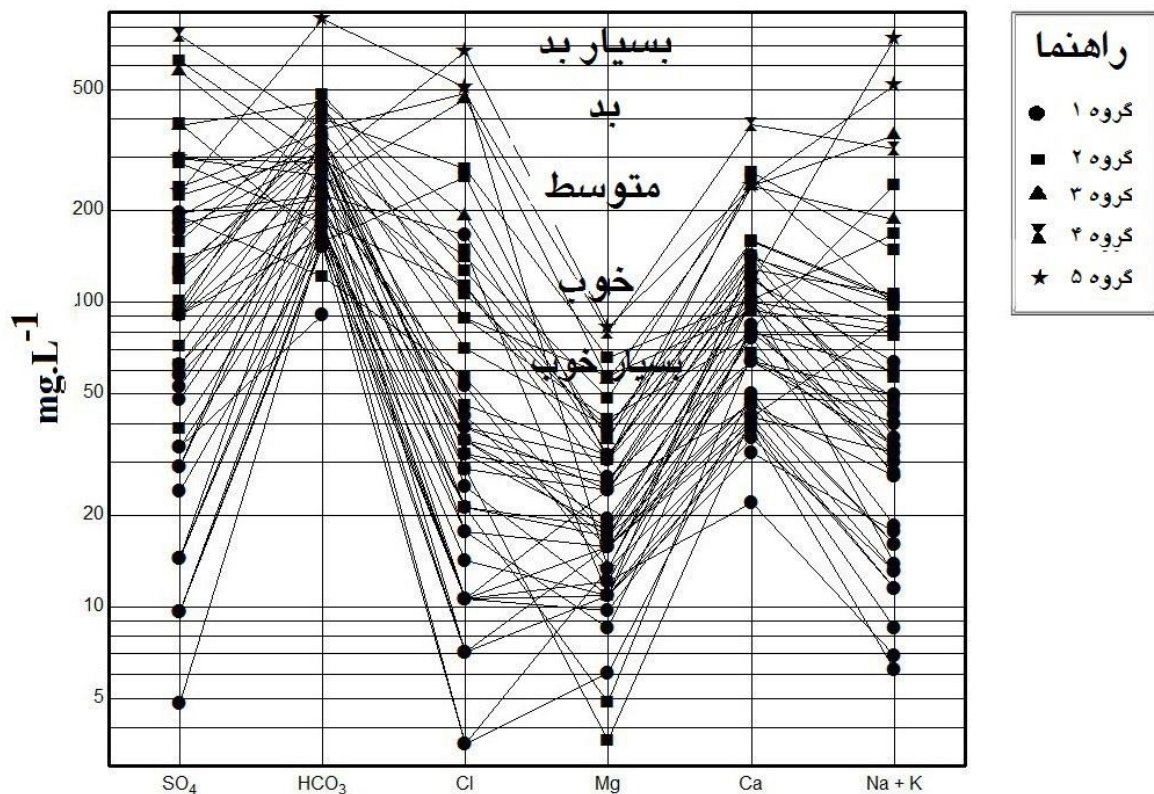


شکل ۴- موقعیت رتبه‌های کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه.

زیرزمینی و همچنین رده‌بندی کیفیت آب زیرزمینی توانایی بالاتری دارد. تمامی پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش مقدار میانگین پایین‌تر از مقدار مجاز استاندارد برای آب شرب دارند، به جز بی‌کربنات که مقدار آن بالاتر از حد مجاز است. مقدار بالای بی‌کربنات در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و تغذیه آبخوان از سازندهای سخت سبلان و بزقوش برمی‌گردد. با بررسی نتایج تحلیل ضرایب همبستگی مشخص شد؛ همبستگی مثبت قوی بین هدایت الکتریکی با سولفات و کلسیم ( $r=0/84$ ) وجود دارد. همچنین هدایت الکتریکی همبستگی متوسط با بی‌کربنات و منیزیم دارد. از این‌رو بیشترین تأثیرپذیری هدایت الکتریکی از کلسیم و سولفات است؛ بنابراین اکثر تغییرات پارامترهای هیدروشیمیایی منطقه مورد مطالعه به دلیل عوامل زمین‌شناسی و محیطی است.

به‌منظور بررسی و مقایسه توانایی روش آنتروپی نسبت به دیگر روش‌های مرسوم از نمودار شولر استفاده شد. نمودار شولر (شولر ۱۹۵۹) یکی از نمودارهای مهم و پرکاربرد در بررسی کیفیت آب شرب است. این نمودار با توجه به مقیاس لگاریتمی، از نظر سرعت عمل، سهولت مقایسه و نمایش تعداد زیادی نمونه در یک نمودار، از اهمیت خاصی برخوردار است.

در شکل ۵ ترسیم نمونه‌های کیفیت آب زیرزمینی در نمودار شولر نشان داده شده است. اغلب نمونه‌ها در نمودار شولر نیز در رده بسیار خوب قرار می‌گیرند. برخی دیگر از نمونه‌ها نیز در رده خوب قرار گرفته‌اند. در نمودار شولر تفکیک مناسبی بین کیفیت‌های مختلف وجود ندارد و تنها نمونه‌های آب زیرزمینی را در نموداری لگاریتمی و در کنار هم می‌آورد. با مقایسه نمودار شولر و روش آنتروپی به‌نظر می‌رسد روش آنتروپی در بیان تاثیر پارامترهای موثر بر کیفیت آب



شکل ۵- ترسیم نمونه‌های آب زیرزمینی توسط نمودار شولر.

سازندهای سخت منطقه و نیترات به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری در منطقه مورد مطالعه است که باعث بروز تأثیرات زیست‌محیطی بر کیفیت آب زیرزمینی خواهد شد. بیشترین وزن انتروپی نیز مربوط به منیزیم است و نشان می‌دهد که تغییرات پایدار و یکنواختی در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برقرار است.

به‌طور کلی نتایج نشان داد ۵۳ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در رتبه یک، ۱۸ درصد در رتبه ۲ و رتبه‌های سه، چهار و پنج به ترتیب چهار، دو و چهار درصد از نمونه‌ها را به خود اختصاص دادند. بنابراین کیفیت آب زیرزمینی اغلب چاه‌های منطقه مورد مطالعه در رده خوب و بسیار خوب قرار می‌گیرد.

وجود رسوبات مارنی و تبخیری در بخش غربی و مرکزی محدوده مطالعاتی باعث کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. همچنین نقش تغذیه‌کنندگی سازندهای سخت بخش شمالی و جنوبی آبخوان باعث تغییرات کیفیت آب زیرزمینی و انحلال برخی کانی‌های موجود در سازندهای سخت، در آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی شده است. از این رو به دلیل تنوع سنگ‌شناختی منطقه، کیفیت آب‌های زیرزمینی دستخوش تغییرات زیادی شده است.

نتایج کاربرد روش انتروپی نشان داد کلرور بالاترین نرخ تأثیرگذاری بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه را داراست. همچنین نتایج بررسی روش انتروپی نشان داد سدیم، پتاسیم و نیترات دارای بیشترین ناپایداری و تغییرات مداوم است. سدیم و پتاسیم به دلیل ورود فصلی تغذیه آبخوان از هوازدهگی

## منابع مورد استفاده

- جلالی ل و اصغری مقدم ا، ۱۳۹۲. تشخیص وضعیت هیدروژئوشیمیایی و روند شوری در سفره آب زیرزمینی دشت خوی به روش‌های آماری و هیدروشیمیایی. فصل‌نامه محیط‌شناسی، جلد ۳۹، شماره ۲، صفحه‌های ۱۱۳ تا ۱۲۲.
- لاله‌زاری ر و طباطبایی ح، ۱۳۸۹. خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی دشت شهرکرد. فصل‌نامه محیط‌شناسی، جلد ۵۳، شماره ۴، صفحه‌های ۶۲ تا ۵۵.
- نخعی م و ودیعی م، ۱۳۹۱الف. تجزیه و تحلیل فازی آب زیرزمینی استان تهران به لحاظ شرب. فصل‌نامه زمین‌شناسی ایران، جلد ۲۳، شماره ۴، صفحه‌های ۳۷ تا ۴۶.
- نخعی م و ودیعی م، ۱۳۹۱ب. ارزیابی کیفیت آب شرب درگز با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجله پژوهش آب ایران، جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه‌های ۱۱۷ تا ۱۲۴.
- Comply HH, 1945. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. *Journal of American Medicines Association* 129: 112- 117.
- Guey-Shin S, Bai-You C, Chi TC, Pei HY, Tsun KC, 2011. Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in Taiwan. *International Journal of Environmental Resources and Public Health* 8: 1084-1109
- Ip WC, Hu BQ, Wong H, Xia J, 2009. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China. *Journal of Hydrology* 379: 284-290.
- Ishaku JM, 2011. Assessment of groundwater quality index for Jimeta-Yola area, northeastern Nigeria. *Journal of Geology and Mining Research* 9: 219-231
- Pei-Yue L, Hui Q, Jian HW, 2010. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, North West China. *E-Journal of Chemistry* 7: S209-S216
- Samani S, Asghari Moghaddam A, Vadiati M, Jahromi ZN, 2014. Use of water quality index and geographical information system to assess groundwater quality. *Agricultural Advances* 3: 159-169.
- Schoeller H, 1959. *Arid Zone Hydrology Recent Developments*. UNESCO Rev.
- Shannon Claude E, 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27: 379-423.
- Simos FS, Moriera AB, Bisinoti MC, Gimenez SMN, Yabe MJS, 2008. Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies. *Ecological indicators* 8: 476-484
- Todd KD, Mays LW, 2005. *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, New York.
- WHO 2008. *Guidelines for Drinking Water Quality Recommendation*. Vol. I World Health Organization, Geneva.
- Wu JP, Li H, Qian M, 2011. Groundwater quality in Jingyuan County, a semi-humid area in Northwest China. *E-Journal of Chemistry* 8: 787-793.