



Investigating Groundwater Quality of Bostanabad Plain for Drinking Purpose Using Multiple Criteria Decision Making Methods

Sh. Soltani¹, A. Asghari Moghaddam^{2*}, and J. Shiri³

Abstract

The drinking water of Bostanabad region is mostly supplied from the groundwater resources of Bostanabad Plain. The aim of this study is to select the most reasonable and suitable method for investigating the quality of this resources. For this purpose, the rate and weight of the water quality index were calculated using multi-criteria decision making methods. The quality of groundwater resources was investigated by combining entropy and AHP weighting methods with TOPSIS and WQI rating methods. In this study, parameters of pH, TDS, Na, SO₄, Cl, NO₃ and F were used in the combined methods of Entropy-WQI, AHP-WQI, Entropy-TOPSIS and AHP-TOPSIS. The coefficient of determination (R^2) between the average rank of the samples and the ranks obtained from each of the methods showed that the AHP-TOPSIS method has a high ability to ranking and classifying water resources. The samples are placed in different ranges according to the different weighting and rating of each method, so that the samples were located in the Entropy-WQI method in 2 classes of good and average, in the AHP-WQI method in 3 classes of very good, good, and average, in the Entropy-TOPSIS method in 5 classes of very good, good, average, poor, and very poor and in AHP-TOPSIS method in 4 classes very good, good, medium and poor. By comparing the combined methods, it became clear that AHP was better than entropy in terms of weighting and TOPSIS was better than the classical WQI method in terms of rating. The results showed that the TOPSIS method leads to the evolution of the samples quality classification and the entropy method is caught in an error regarding the values that are similar and close to the minimum value of the parameters that have a direct relationship with entropy.

Keywords: Bostanabad Plain, Groundwater Quality, Entropy, Analytical Hierarchy Process, TOPSIS.

Received: October 14, 2022

Accepted: December 17, 2022

بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد از نظر شرب با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

شهبلا سلطانی^۱، اصغر اصغری مقدم^{۲*} و جلال شیرینی^۳

چکیده

آب شرب منطقه بستان‌آباد غالباً از منابع آب‌زیرزمینی دشت بستان‌آباد تأمین می‌شود. هدف این پژوهش انتخاب معقول‌ترین و مناسب‌ترین روش برای بررسی کیفیت این منابع است. بدین منظور رتبه و وزن شاخص کیفی آب با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره محاسبه شد. کیفیت منابع آب زیرزمینی با ترکیب روش‌های وزن‌دهی آنتروپی و AHP با روش‌های رتبه‌دهی TOPSIS و WQI بررسی شد. در این مطالعه پارامترهای pH، TDS، Na، SO₄، Cl، NO₃ و F در روش‌های ترکیبی Entropy-WQI، AHP-WQI، Entropy-TOPSIS و AHP-TOPSIS به کار برده شد. ضریب تعیین (R^2) بین رده میانگین نمونه‌ها و رده‌های حاصل از هر یک از روش‌ها نشان داد که روش AHP-TOPSIS توانایی بالایی در رده‌بندی و دسته‌بندی نمونه‌های آب دارد. نمونه‌ها با توجه به وزن‌دهی و رتبه‌دهی متفاوت هر روش در بازه‌های متفاوتی جای دارند به طوری که نمونه‌ها در روش Entropy-WQI در ۲ دسته خوب و متوسط، در روش AHP-WQI در ۳ دسته بسیار خوب، خوب و متوسط، در روش Entropy-TOPSIS در ۵ دسته بسیار خوب، خوب، متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف و در روش AHP-TOPSIS در ۴ دسته بسیار خوب، خوب، متوسط و ضعیف قرار گرفتند. با مقایسه روش‌های ترکیبی روشن شد که از نظر وزن‌دهی ahp بهتر از آنتروپی و از نظر رتبه‌دهی TOPSIS بهتر از روش کلاسیک WQI بوده است. نتایج نشان داد که روش TOPSIS سبب تکامل دسته‌بندی کیفیت نمونه‌ها می‌شود و روش آنتروپی در خصوص مقادیر مشابه و نزدیک به مقدار حداقل پارامترهایی که رابطه مستقیم با آنتروپی دارد دچار خطا می‌شود.

کلمات کلیدی: دشت بستان‌آباد، کیفیت آب زیرزمینی، آنتروپی، تحلیل سلسله‌مراتبی، TOPSIS.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۶

1- Ph.D. Student of Hydrogeology, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.

2- Professor, Earth Sciences Department, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran. Email: moghaddam@tabrizu.ac.ir

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Agricultural Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.3.2.1](https://doi.org/10.117352347.1402.19.3.2.1)

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

طبیعت در مسیری قرار گرفته است که دیگر پاسخگوی تأمین آب کافی برای ادامه زندگی انسان‌ها نیست. مسأله مهم‌تر این است که همان آبی که اکنون در دسترس است باید سالم و از کیفیت کافی برخوردار باشد تا با مصرف آن بحران‌های جدیدی ایجاد نشود.

به این منظور به کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ($MCDM^2$) از پرطرفدارترین رویکردهای حل مسائل کیفی آب خواهد بود. آنتروپی (Entropy)، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP^3)، شیوه اولویت‌بندی براساس شباهت به راه حل ایده‌آل ($TOPSIS^4$) و سایر روش‌ها مثال‌هایی از $MCDM$ هستند.

در چندین مطالعه با ایده جلوگیری از قضاوت کارشناسی در بخش وزن‌دهی WQI به ترکیب آنتروپی با WQI پرداخته‌اند (Gorgij et al., 2017; Li et al., 2021; Liu et al., 2021; Zhang et al., 2021). در این دسته از مطالعات از روش وزن‌دهی کلاسیک WQI صرف‌نظر کرده‌اند اما رتبه‌دهی مطابق اصول WQI انجام گرفته است. برای مثال Gorgij et al. (2017) کیفیت آب زیرزمینی مصارف شرب دشت آذرشهر را با استفاده از تئوری آنتروپی مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آن را با خود همبستگی مکانی پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب مقایسه کردند که نتایج حاصل از خودهمبستگی مکانی نتایج آنتروپی را تأیید کرد.

در گروهی دیگر از مطالعات نیز رتبه‌دهی با روش‌هایی متفاوت از روش مرسوم WQI به دست آمده است؛ اما با همان روش WQI وزن‌دهی انجام گرفته است. برای مثال Zahedi et al. (2017) برای ارزیابی و اعتبارسنجی شاخص کیفیت آب زیرزمینی از دو مدل تصمیم‌گیری چند معیاره شامل $TOPSIS$ و برنامه‌ریزی سازش (CP^5) استفاده کرده‌اند. در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی طبقات کیفی، فواصل شاخص کیفی آب زیرزمینی کلاسیک اصلاح شد. پس از بهره‌گیری از روش‌های $MCDM$ نتایج نشان داد که WQI به ندرت می‌تواند طبقات کیفی را ارزیابی کند. همچنین، $TOPSIS$ در تعداد نمونه (چاه) کمتر پاسخ دقیق‌تری خواهد داشت و افزایش مقدار در پارامتر حساسیت برنامه‌ریزی سازش باعث کاهش دقت خواهد شد. در مثالی دیگر Yousefi et al. (2018) از مدل‌های $MCDM$ مانند $TOPSIS$ ، برنامه‌ریزی سازشی (cp) و میانگین وزنی مرتب شده برای کاهش تناقضات WQI استفاده کرده‌اند که به کارگیری آن‌ها منجر به تغییرات چشمگیر در رتبه‌بندی و دسته‌بندی چاه‌ها شده است.

در مطالعات دیگری از شاخص کیفی آب، هر دو بخش محاسباتی WQI یعنی وزن و رتبه با روشی متفاوت از اصول WQI محاسبه می‌شود که ترکیب آنتروپی و $TOPSIS$ برای بررسی کیفیت آب از این مطالعات است (Gorgij et al., 2019; Li et al., 2012, 2018). برای مثال Li et al. (2012) از سه جزء کلیدی در مطالعه‌ای برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی بهره گرفته‌اند. آن‌ها در ابتدا با استفاده از

کیفیت منابع آب زیرزمینی هنگام وقوع خشکسالی بحرانی‌تر خواهد بود؛ چراکه متناسب با کاهش دبی بار آلودگی پایین نمی‌آید (Moridi et al., 2017). ناگفته مشخص است که در چنین شرایطی آب‌زیرزمینی تنش‌های بسیاری را متحمل خواهد شد و پیامدهای آن علاوه بر ایجاد افت سطح آب در سفره‌ها سبب آلودگی‌های گوناگون در این منابع خواهد شد (Soltani and Asghari Moghaddam, 2021). در چنین مواقعی پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی در اولویت نهادها و سازمان‌ها قرار خواهد گرفت و چارچوب سیاست‌های نهادها برای اجرای طرح‌های مدیریتی تحت تأثیر شاخص‌های زیست‌محیطی خواهد بود (Soltani et al., 2017).

بحث کیفیت آب زیرزمینی و بررسی آلودگی‌های احتمالی آن زمانی پررنگ‌تر می‌شود که این منابع، تأمین‌کننده مصارف شرب یک جامعه باشد و به طور مستقیم سلامت انسان‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Li et al., 2017). طبق آماری اعلامی در مطالعات Li et al. (2012) تاکنون ۶۰ روش با مزایا و معایب گوناگون طراحی شده است تا کیفیت آب آشامیدنی به واسطه آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. روش‌هایی با ویژگی‌های متنوع دشواری‌هایی در هنگام انتخاب بهترین روش نیز خواهد داشت.

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی، شاخص کیفیت آب (WQI^1) است که توسط Brown et al. (1970) ارائه شده است (Zahedi et al., 2017). این روش کیفیت آب را با بیان عددی مشخص می‌کند (Asghari Moghaddam and Vadiati, 2016). بسیاری از محققان معتقدند که WQI به دلیل اشکالات ساختاری، نتایج مطلوبی نخواهد داشت و در نهایت دسته‌بندی قطعی و غیر قابل انعطافی عرضه خواهد کرد (Zahedi et al., 2017). بنابراین به این نتیجه رسیده‌اند که دستیابی به روشی که منجر به تصمیم‌گیری قابل اعتماد و انعطاف‌پذیر شود ضروری است (Zahedi et al., 2017). با توجه به این که WQI از وزن پارامترها و رتبه تعیین شده به دست می‌آید محققان را به بهبود محاسبه وزن و رتبه با روش‌های گوناگون سوق داده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

دشت بستان آباد با وسعتی حدود ۱۸۸ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران در استان آذربایجان شرقی به فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان تبریز قرار دارد (شکل ۱a). حوضه آبریز این دشت قسمتی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که رودخانه اوجان چای مهم‌ترین منبع آب سطحی در حوضه آبریز دشت است. پست‌ترین نقطه ارتفاعی حوضه آبریز در قسمت شمال شرق منطقه با ارتفاع ۱۷۰۰ متر از سطح دریا و بلندترین نقطه ارتفاعی در بخش جنوب غرب منطقه (ارتفاعات بیوک داغ) و با ارتفاع بیش از ۳۵۰۰ متری از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱a). این منطقه از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک سرد محسوب می‌شود.

در پیشینه مطالعات کیفی از منطقه (Pakniya 2015) در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان ارزیابی هیدروژئوشیمی آبخوان بستان‌آباد به بررسی کیفی منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند که کیفیت آب را با کمک نمودار شولر در رده خوب تا قابل قبول به دست آورده‌اند.

۲-۱- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مطالعاتی

شکل ۱b نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. در محدوده مطالعاتی در بخش غربی حوضه آبریز سنگ‌هایی با جنس آهک مارنی، شیل آهکی، آهک و ماسه آهکی رخمون دارد. سنگ‌هایی به جنس گرانیت، آپلیت و ریولیت در جنوب و سنگ‌های داسیت در شرق حوضه آبریز نمایان است. نیمه جنوبی حوضه آبریز غالباً با سنگ‌های متعلق به دوران پلیوسن و ائوسن و بخش عمده‌ای از نیمه شمالی حوضه آبریز با سنگ‌های میوسن احاطه شده است در مقطع زمانی کواترنری در بخش جنوب غربی بستان‌آباد و در مجاورت کوه سهند توف‌هایی قرار گرفتند که عمدتاً از جنس آذرین و آندزیت-تراکیت است که باندهایی از کنگلومرای سست در بین آن‌ها جای گرفته است. این آبرفت‌ها در ارتفاعات واقع شده‌اند و بیش‌تر روزهای سال از برف پوشیده هستند که آب حاصل از ذوب برف‌ها به لایه‌های نفوذپذیر راه پیدا کرده و سفره‌های آبدار را سبب شده است.

مخزن آب زیرزمینی در درون نهشته‌های آبرفتی، خاکسترهای آتشفشانی و اجزای آذرآاری است. این اجزای آتشفشانی عمدتاً توف و در غالب موارد در حد ماسه ریز گاهی همراه با لای است. در دشت بستان‌آباد تنها یک آبخوان و از نوع آزاد وجود دارد که سنگ کف آبخوان عمدتاً از جنس مارن و رس است.

کاهش ویژگی مجموعه راف پارامترهای مورد استفاده را تعیین کردند سپس با آنتروپی و TOPSIS به محاسبه شاخص کیفیت پرداختند. یا در نوعی دیگر از مقالات مشابه مقاله (Goodarzi et al. 2022) برای رفع تناقضات رتبه‌بندی توسط WQI از روش‌های ترکیبی FAHP- WQI و FAHP-TOPSIS استفاده کرده‌اند که از آن‌ها به عنوان روش‌های مناسب و مکمل یاد شده است.

منطقه بستان‌آباد، با اقلیم خشک سرد وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارد بنابراین ضروری است از نظر برخورداری از ایمنی کافی برای شرب مورد بررسی قرار گیرد. حال برای انتخاب معقول‌ترین و مناسب‌ترین روش شاخص کیفیت آب زیرزمینی در منطقه نیاز است که روش‌های گوناگونی مورد بحث و آزمایش قرار گیرد تا در بخش رده‌بندی و طبقه‌بندی ابهامات کمتر شود. در این مطالعه AHP به عنوان یک روش مبتنی بر نظر کارشناسی بر روش وزن‌دهی کلاسیک WQI که خود متأثر از قضاوت کارشناسی است ترجیح داده شده است چراکه در روش AHP نظرات با رعایت قیود و تعیین نرخ ناسازگاری به دست آمده و نسبت به وزن‌دهی کلاسیک WQI مطمئن‌تر است. از طرفی در روش ترکیبی دیگر برای ایجاد روشی به دور از قضاوت کارشناسی در وزن‌دهی از روش آنتروپی (روش مبتنی بر پراکندگی معیار) استفاده شده است تا بر خلاف سایر مطالعات، وزن‌دهی هم از دیدگاه قضاوت کارشناسی و هم عاری از هر نظر شخصی سنجیده شود. لازم به ذکر است که تا به حال AHP به صورت ترکیبی در شاخص کیفیت آب به کار برده نشده است و به صورت فازی- AHP بوده است. از نظر رتبه‌دهی نیز روش TOPSIS و روش کلاسیک WQI به کار برده شده است تا تغییرات ایجاد شده به واسطه رتبه‌بندی گزینه‌ها با TOPSIS براساس بیش‌ترین میزان شباهت یا نزدیکی به گزینه ایده‌آل مثبت و کمترین میزان شباهت به گزینه ایده‌آل منفی به خوبی رصد شود. روش‌های MCDM در این مطالعه به عنوان جایگزین برای روش کلاسیک WQI به کار برده می‌شود تا به منظور کاربردی کردن WQI میزان تغییرات در جهت مثبت یا منفی با به‌کارگیری MCDM مشخص شود حال آن که خود روش‌های MCDM می‌تواند دچار خطا شود و تکیه بر نتایج آن صحیح نباشد که این مسأله نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور با ترکیب روش‌های وزن‌دهی آنتروپی و AHP با روش‌های رتبه‌دهی TOPSIS و WQI سعی شده است که کیفیت آب از طریق چهار روش ترکیبی به دست آید که رده‌بندی و دسته‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی با توجه به اصول رتبه‌دهی و وزن‌دهی هر روش مقایسه خواهد شد. در این مطالعه با ترکیب‌های متفاوت نگاه جامع‌تر در عین حال ریزبین‌تری به تغییرات خواهیم داشت.

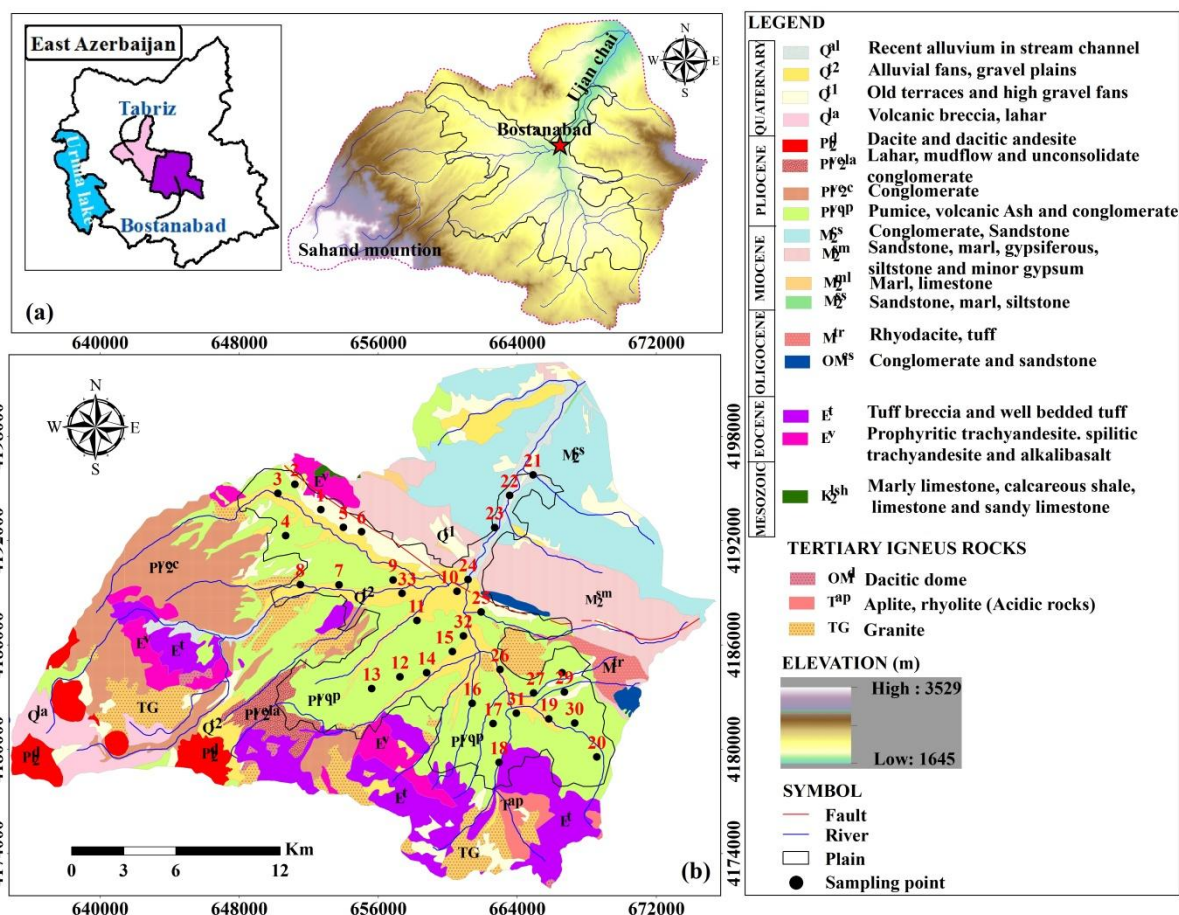


Fig. 1- a) Geographical location of the Bostanabad region along with its digital elevation map and b) the geological map of Bostanabad region along with the sampling points

شکل ۱- a) موقعیت جغرافیایی منطقه بستان‌آباد به همراه نقشه ارتفاع رقومی آن و b) نقشه زمین‌شناسی منطقه بستان‌آباد به همراه نقاط نمونه‌برداری

۳- روش تحقیق

۳-۱- نمونه‌برداری و آنالیز

به منظور ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی، ۳۳ نمونه از منابع آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد در شهریور ماه سال ۱۳۹۸ جمع‌آوری شد. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱b نشان داده شده است. نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری عناصر فرعی- اصلی در بطری‌های پلی‌اتیلن تهیه شدند. کاغذ صافی با اندازه منافذ ۲۵-۲۰ میکرومتر برای فیلتراسیون نمونه‌های دارای کدورت استفاده گردید. اسیدیته و هدایت الکتریکی در محل نمونه‌برداری سنجیده شد. عناصری مانند کلسیم، منیزیم، کلراید، کربنات و بی‌کربنات به وسیله تیتراسیون؛ سدیم و پتاسیم به وسیله فتومتر شعله‌ای؛ سولفات به وسیله روش توریدومتري؛ نیترات، سیلیس و فلوراید به روش اسپکتوفتومتر در آزمایشگاه آب‌شناسی گروه علوم زمین دانشگاه تبریز اندازه‌گیری شدند.

در دشت بستان‌آباد ۲۰ دهنه چشمه وجود دارد که ۶ مورد از آن به دلیل افت سطح آب زیرزمینی خشک شده است و نیز ۱۵ رشته قنات وجود دارد که ۷ مورد آن خشک شده است. حدود ۱۰۰۶ حلقه چاه به منظور بهره‌برداری وجود دارد که تخلیه سالانه آن‌ها حدود ۲۲/۶۸ میلیون متر مکعب است.

آب زیرزمینی در منطقه نیز از سمت جنوب‌غربی به سمت شمال شرقی جریان می‌یابد. شیب آب زیرزمینی در حواشی دشت به خصوص در دامنه جنوب‌غربی دشت بیش‌تر است و به تدریج در بخش‌های میانی دشت به دلیل وفور چاه‌های بهره‌برداری از میزان شیب کاسته می‌شود.

۳-۳- وزن‌دهی به روش AHP

تحلیل سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن سه اصل ترسیم درخت سلسله‌مراتبی، تعیین اولویت‌ها و بررسی سازگاری منطقی قضاوت‌ها به حل مسأله می‌پردازد. این روش متشکل از چهار سطح هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها است که توسط (Saaty 1980) ارائه شده است. وزن‌دهی در این روش با تشکیل یک ماتریس مقایسه زوجی حاصل از سطر و ستون معیارها آغاز می‌شود (رابطه ۵).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

در مرحله بعد ماتریس مقایسه زوجی باید نرمال شود به صورتی که عناصر هر ستون نرمال می‌شود و بردار وزن از میانگین سطری عناصر حاصل می‌شود. در نهایت بایستی برای اطمینان از منطقی بودن قضاوت‌ها از معیاری به نام نرخ ناسازگاری (I.R) استفاده کرد (Tavakkoli et al., 2018). در صورتی می‌توان به وزن‌ها اعتماد نمود که نرخ ناسازگاری برابر یا کمتر از مقدار ۰/۱ باشد (Rashid Sorkh Abadi et al., 2014).

در مطالعاتی که برای تعیین حجم نمونه کارشناسان در تحقیق حاضر انجام شده است یافته‌ها از این قرار است که تعیین حجم نمونه کارشناسان در AHP با استفاده از فرمول کوکران صحیح نخواهد بود. از طرفی بنا به نظر (Saaty 1980) تعداد ۱۰ نفر برای مقایسات زوجی کافی است اما همانطور که می‌دانیم افراد واجد شرایط برای پاسخ‌دهی به مقایسات زوجی محدود است. همچنین در مطالعات (Baby 2013) و (Melillo and Pecchia 2016) بیان شده است که روش و فرمول دقیقی برای محاسبه تعداد کارشناس وجود ندارد. بنابراین در این مطالعه با تکیه بر تجربه در این زمینه و پرسش از فعالان و کارشناسان آمار، مینا را بر ۵ کارشناس قرار دادیم و از نظرات آن‌ها بهره گرفتیم. کارشناسان در وزن‌دهی، به فاکتورهایی مانند میزان مخرب بودن پارامترها در مقادیر مختلف با توجه به استانداردهای (WHO 2017)، بازه تغییرات غلظت و پراکندگی هر پارامتر در منطقه مطالعاتی و منشأ پارامترها با توجه به عوامل زمین‌زاد و انسان‌زاد توجه کرده‌اند. در این مطالعه تحلیل سلسله‌مراتبی با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice 11 صورت گرفت و نرخ ناسازگاری برابر ۰/۰۴ به دست آمد.

۳-۴- رتبه‌دهی به روش WQI

در این روش رتبه‌دهی کیفی (qj) از رابطه ۶ و ۷ حاصل می‌شود.

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (6)$$

$$q_{pH} = \frac{C_{pH}-7}{8.5-7} \times 100 \quad (7)$$

صحت نتایج آنالیزهای هیدروشیمیایی یون‌های اصلی برای هر دو مجموعه داده با استفاده از رابطه خطای بالانس یونی (رابطه ۱) مورد بررسی قرار گرفت.

$$I. B. E = \frac{\sum Cation - \sum Anion}{\sum Cation + \sum Anion} \times 100 \quad (1)$$

غلطت کل کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب meq/L بوده و مقدار قابل قبول خطای بالانس یونی برای داده‌های شیمیایی، کمتر از ۵٪± است (Mazor, 2003).

در این مطالعه برای بررسی کیفیت از روش‌های وزن‌دهی آنتروپی و AHP و رتبه‌دهی WQI و TOPSIS استفاده شده است. از ترکیب این روش‌ها چهار شاخص کیفی Entropy-WQI، AHP-WQI، Entropy-TOPSIS و AHP-TOPSIS به دست آمده است.

۳-۲- وزن‌دهی به روش آنتروپی

روش آنتروپی توسط (Shannon 1948) مطرح گردید. به کمک این روش می‌توان میزان تصادفی بودن یک رخداد را در قالب معادلات ریاضی نشان داد (Shyu et al., 2011). از نظر ریاضی رابطه معکوسی بین احتمال رخداد یک رویداد و میزان آنتروپی اطلاعات وجود دارد پس در صورتی که رخداد یک رویداد به طور دقیق پیش‌بینی شود در مقابل احتمال رخداد آن نیز افزایش می‌یابد ولی در عوض میزان آنتروپی اطلاعات کوچک خواهد بود (Amiri et al., 2014).

بر اساس داده‌های کیفیت آب زیرزمینی برای m نمونه و n پارامتر ماتریس تصمیم اولیه به صورت زیر خواهد بود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در ماتریس تصمیم‌گیری چند معیاره غالباً از شاخص‌هایی (پارامترهایی) با درجه کمیت متفاوت همراه با واحدهای اندازه‌گیری متفاوت استفاده می‌شود. بنابراین برای امکان مقایسه شاخص‌ها با یکدیگر نرمال‌سازی داده‌ها ضرورت دارد. شاخص‌ها می‌توانند در دو دسته مثبت و منفی جای گیرند. در بحث بررسی کیفیت آب تمامی شاخص‌ها به جز pH شاخص منفی به حساب می‌آیند. برای شاخص‌های مثبت و منفی توابع نرمال‌سازی به صورت روابط ۳ و ۴ خواهد بود:

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

$$y_{ij} = \frac{x_{ij\max} - x_{ij}}{x_{ij\max} - x_{ij\min}} \quad (4)$$

ادامه محاسبات طبق روابط ذکر شده توسط (Amiri et al. 2014) انجام گرفت.

مرحله بعد محاسبه گزینه ایده‌آل مثبت (f_j^+) و منفی (f_j^-) و محاسبه فاصله از این گزینه‌ها (d^+ و d^-) با استفاده از روابط زیر است:

$$f_j^+ = \max\{f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}\} \quad (13)$$

$$f_j^- = \min\{f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}\} \quad (14)$$

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij} - \max f_{ij})^2} \quad (15)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij} - \min f_{ij})^2} \quad (16)$$

مرحله آخر محاسبه ضریب TC برای هر نمونه است (رابطه ۱۷). این ضریب با توجه به کارگیری هر یک از وزن‌های حاصل از آنتروپی یا AHP به ترتیب نشان‌دهنده رتبه‌بندی توسط روش‌های Entropy-TOPSIS یا AHP-TOPSIS خواهد بود.

$$TC = \frac{d^-}{d^+ + d^-} \quad (17)$$

باید توجه شود که مقدار TC همواره بین صفر و یک است و هر چه به گزینه ایده‌آل مثبت نزدیک باشد مقدار TC به یک نزدیک‌تر و کیفیت آب بهتر خواهد بود.

دسته‌بندی روش Entropy-TOPSIS در مطالعات Gorgij et al. (2019) ارائه شده است. با توجه به مشابه بودن روش رتبه‌دهی این دسته‌بندی برای AHP-TOPSIS نیز کاربرد دارد که می‌تواند پارامترهایی متفاوت، کمتر یا بیش‌تر از این تعداد نیز باشد. با توجه به جدول ۲ می‌توان این دسته‌بندی را انجام داد. مقادیر این جدول به عنوان نمونه‌های آب مجازی در نظر گرفته می‌شوند و مقادیر TC آن‌ها مثل نمونه‌های واقعی حساب می‌شود. در نهایت TC نمونه‌های واقعی با توجه به TC نمونه‌های مجازی دسته‌بندی می‌شود.

۴- نتایج و تحلیل نتایج

ویژگی‌های آماری پارامترهای شیمیایی اندازه‌گیری شده در جدول ۳ نشان داده شده است. تغییرات اسیدیته در محدوده ۷/۳۷ تا ۹/۵۵ (مقدار متوسط برابر با ۷/۹۷) نشان‌دهنده آب نسبتاً قلیایی است. مقدار کل جامدات محلول (TDS) با استفاده از مقادیر هدایت الکتریکی و از ضرب آن‌ها در عدد ۰/۶ به دست آمد که مقادیر این پارامتر در بازه ۱۲۱/۲ تا ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (مقدار متوسط برابر با ۵۳۸/۲۷ میلی‌گرم بر لیتر) است. ترتیب فراوانی کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی براساس میانگین به صورت $Na^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < K^+$ و $HCO_3^- < SO_4^{2-} < Cl^-$ است. مقدار متوسط برای نترات، فلوئوراید و سیلیس به ترتیب ۹/۷۷، ۰/۶۴ و ۵۰/۲۲ به دست آمده است.

Cj و Sj به ترتیب غلظت پارامتر شیمیایی هر نمونه و غلظت همان پارامتر براساس رهنمودهای کیفیت آب برای مصارف شرب بر حسب mg/L است. در این پژوهش از استاندارد (2017) WHO استفاده شد. در مرحله پایانی جهت رده‌بندی کیفیت آب، محاسبه‌ای از طریق رابطه زیر انجام می‌گیرد:

$$Index = \sum_{j=1}^n w_j q_j \quad (8)$$

در رابطه فوق w_j وزن محاسبه شده از طریق آنتروپی و AHP خواهد بود و شاخص با توجه به روش وزن‌دهی به کار برده شده برابر کیفیت حاصل از روش‌های Entropy-WQI یا AHP-WQI خواهد بود. دسته‌بندی نمونه‌ها در روش Entropy-WQI توسط Subba Rao et al. (2020) به صورت جدول ۱ ارائه شده است که با توجه به یکسان بودن روش رتبه‌دهی برای AHP-WQI نیز کاربرد دارد.

Table 1- Classification of groundwater quality based on Entropy-WQI and AHP-WQI for drinking purposes (Subba Rao et al., 2020)

جدول ۱- دسته‌بندی کیفیت آب زیرزمینی براساس Entropy-WQI و AHP-WQI برای مصارف شرب (Subba Rao et al., 2020)

Water quality	Entropy-WQI/ AHP-WQI
Excellent	< 25
Good	25-50
Medium	50-100
Poor	100-150
Extremely poor	> 150

۳-۵- رتبه‌دهی به روش Topsis

این روش برای اولین بار توسط Hwang and Yoon (1981) ارائه شد. در این روش برای ایجاد ماتریس اولیه، m نمونه از n پارامتر به صورت ماتریس مرتب می‌شوند. این ماتریس مشابه ماتریس رابطه ۲ می‌باشد. در ادامه ماتریس تصمیم اولیه با استفاده از رابطه ۹ به ماتریس نرمال (رابطه ۱۰) تبدیل می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}} \quad (9)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

سپس نوبت به ساخت ماتریس استاندارد وزن‌دهی شده می‌رسد که از روابط زیر به دست می‌آید:

$$f_{ij} = r_{ij} \times w_{ij} \quad (11)$$

$$F = (f_{ij})_{m \times n} \quad (12)$$

در این مطالعه w_{ij} وزن‌های به دست آمده از روش‌های Entropy و AHP خواهد بود.

Table 2- Classification of groundwater quality based on Entropy-TOPSIS and AHP-TOPSIS for drinking purposes (Gorgij et al., 2019)

جدول ۲- دسته‌بندی کیفیت آب زیرزمینی براساس Entropy-TOPSIS و AHP-TOPSIS برای مصارف شرب (Gorgij et al., 2019)

Water quality	pH	TDS (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)
Excellent	7.5	300	40	50	50	5	0.5
Good	7	500	120	150	150	10	1
Medium	6.5	1000	200	250	250	50	1.5
Poor	5.5	2000	280	350	350	75	2
Extremely poor	<5.5	>2000	>280	>350	>350	>75	>2

Table 3- Statistical characteristics of measured chemical parameters

جدول ۳- ویژگی‌های آماری پارامترهای شیمیایی اندازه‌گیری شده

	pH	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	SiO ₂
Unit	-	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Minimum	7.37	121.2	16	0.97	9.5	0.98	136.7	2.65	2	0.91	0.29	20.13
Maximum	9.55	1800	153.1	139	401.7	12.73	854.2	516.7	564.9	22.91	1.38	81.74
Mean	7.97	538.27	41.41	47.25	97.88	4.28	373.7	101.86	74.99	9.77	0.64	50.22

نقشه‌های مکانی TDS و عناصر اصلی در قالب نمودار دایره‌ای در شکل ۲a نشان داده شده است به طوری که شعاع دایره با مقدار TDS تغییر می‌کند. با توجه به روند تغییرات TDS می‌توان گفت که نمونه‌های مرکزی دشت که در تسلط آب‌های حاصل از سنگ‌های آتشفشانی هستند TDS خیلی کمتری نسبت به نمونه‌های واقع در سنگ‌های تبخیری (نمونه‌های شمال دشت) و همچنین نمونه‌های حاصل از اختلاط آب‌های عبوری از سنگ‌های تبخیری و آتشفشانی (نمونه‌های شمال غرب و شرق دشت) دارند. با مقایسه سهم حضور هر عنصر اصلی در سطح نمودار دایره‌ای نمونه‌ها معلوم شد که همزمان با افزایش TDS در نمونه‌ها افزایش نیز در عناصری مانند Na، Cl و SO₄ وجود دارد. مشخص است که روند تغییرات در TDS و EC مشابه خواهد بود چراکه TDS شامل نمک‌های معدنی (به طور عمده کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، بی‌کربنات‌ها، کلرایدها و سولفات‌ها) و مقادیر اندکی از مواد آلی قابل حل در آب است (WHO, 2017) و طبیعی است که هدایت الکتریکی آب با غلظت جامدات یونیزه شده محلول در آب (کل کاتیون‌ها و آنیون‌ها) ارتباط مستقیم داشته باشد و این یون‌ها توانایی هدایت جریان الکتریکی در آب را میسر سازد.

نقشه‌های TDS با pH پدید آید. شکل ۲c پراکندگی نیترات را نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آن در نمونه ۳۱ در شرق دشت و کمترین مقدار آن در نمونه ۱۸ در جنوب شرق دشت دیده می‌شود. الگوی پراکندگی نیترات کاملاً با توسعه کشاورزی در منطقه در ارتباط است به طوری که در مناطق مساعد کشاورزی و به دور از دامنه‌ها نیترات نیز مشاهده می‌شود. بیش‌ترین مقدار در غلظت فلوراید در نمونه ۱۸ در جنوب شرق و کمترین مقدار آن در نمونه ۱۵ در مرکز دشت دیده می‌شود. با مقایسه نقشه پراکندگی TDS و F می‌توان گفت که ارتباطی بین این پارامترها وجود دارد به طوری که در مناطق با TDS بالا فلوراید نیز زیاد است (شکل ۲d). در خصوص پراکندگی غلظت سیلیس در نمونه‌ها همانطور که انتظار می‌رفت این پارامتر تحت تأثیر طبیعت زمین‌شناسی محدوده است و مقادیر بالای سیلیس در مرکز و شمال غرب دشت، مناطقی که بالقوه تحت تأثیر سنگ‌های آتشفشانی است یافت می‌شود (شکل ۲e).

در این مطالعه روش‌های ترکیبی Entropy-WQI، AHP-WQI، Entropy-TOPSIS و AHP-TOPSIS برای بررسی کیفیت ۳۳ نمونه از نظر پارامترهای pH، TDS، Na، SO₄، Cl، NO₃ و F به کار گرفته شدند. شکل ۳ مقدار وزن حاصل از روش‌های وزن‌دهی برای پارامترها را نشان می‌دهد. ترتیب وزن پارامترها در روش آنتروپی به صورت pH < NO₃ < F < Na < SO₄ < TDS است در حالی که این ترتیب وزن در AHP به صورت

مقادیر زیاد pH در مرکز و شرق دشت است که بیش‌ترین مقدار آن در نمونه ۳۰ نمایان است در حالی که کمترین مقدار آن در نمونه ۲۳ دیده می‌شود (شکل ۲b). این اختلاف در اسیدیته سبب ایجاد قدرت انحلال مختلف می‌شود و در نهایت باعث می‌شود تا الگوی معکوسی بین

نمونه) و رده آخر (بدترین نمونه) در بین نمونه‌ها در روش Entropy-WQI به ترتیب نمونه‌های ۴ (با مقدار ۲۹/۰۸) و ۳۰ (با مقدار ۷۷/۷۷)، در روش AHP-WQI به ترتیب نمونه‌های ۱۳ (با مقدار ۱۴/۷) و ۲۳ (با مقدار ۸۴/۰۷)، در روش Entropy-TOPSIS به ترتیب نمونه‌های ۳۲ (با مقدار ۰/۸۹) و ۲۳ (با مقدار ۰/۳۰) و در روش AHP-TOPSIS به ترتیب نمونه‌های ۱۳ (با مقدار ۰/۸۹) و ۲۳ (با مقدار ۰/۴۳) هستند.

پH < TDS < SO₄ = Cl < Na < NO₃ < F، براساس پراکندگی مقدار پارامترها، pH مهم‌ترین و Cl کم اهمیت‌ترین آنهاست در حالی که در روش AHP، F مهم‌ترین و pH کم اهمیت‌ترین پارامتر است.

مقدار نهایی هر یک از روش‌ها برای نمونه‌ها به همراه رده‌بندی هر یک از آن‌ها در جدول ۴ گردآوری شده است. رده نخست (بهترین

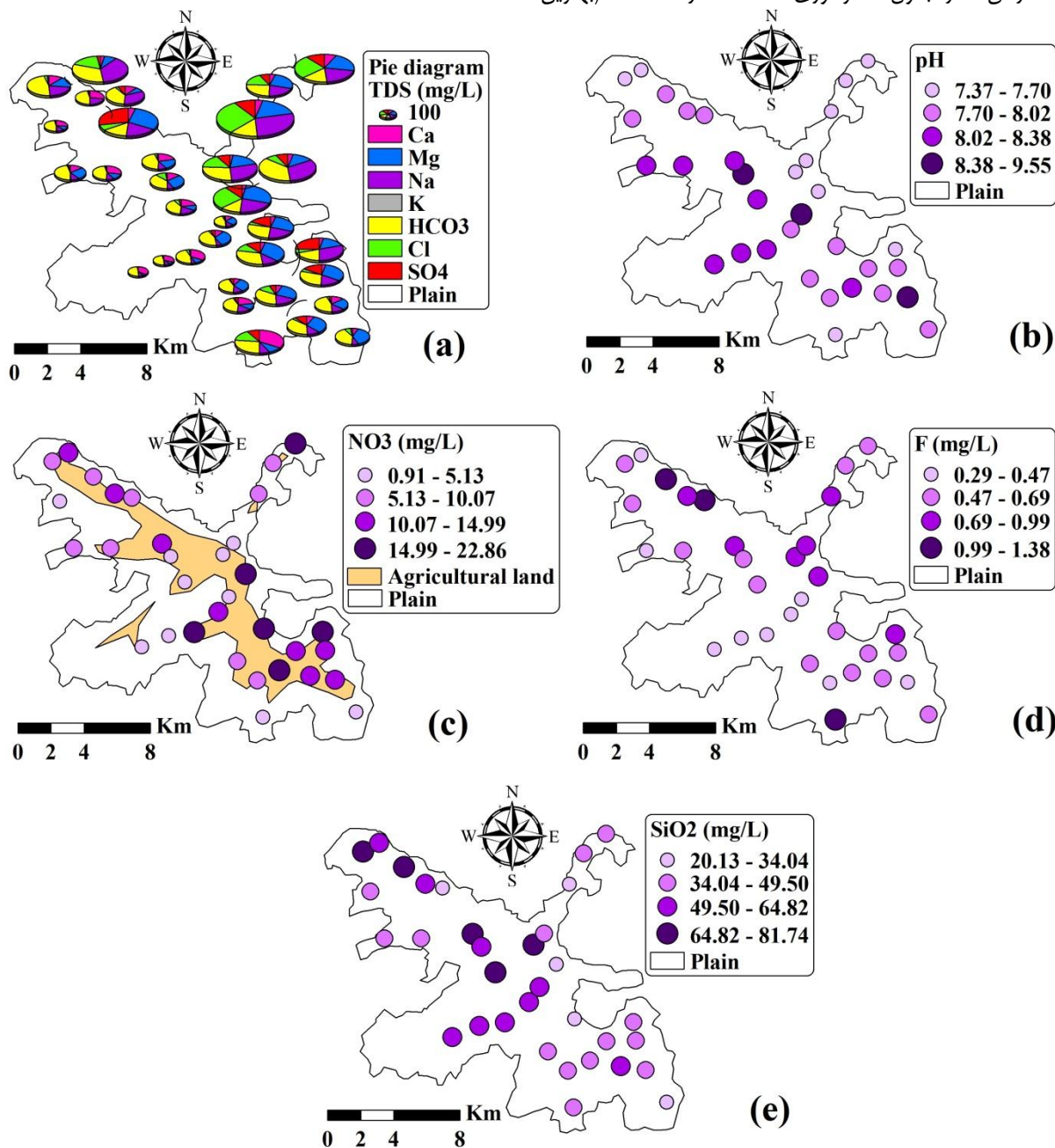


Fig. 2- Spatial distribution of parameters a) major elements with TDS in pie diagram format, b) pH, c) NO₃, d) F and e) SiO₂

شکل ۲- توزیع مکانی پارامترهای (a) عناصر اصلی همراه TDS در قالب نمودار دایره‌ای، (b) pH، (c) NO₃، (d) F و (e) SiO₂

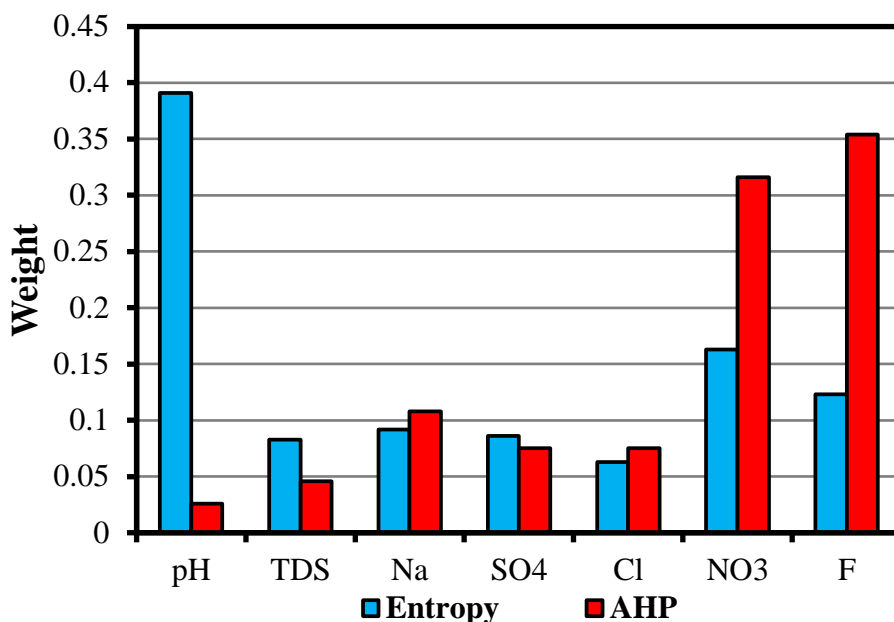


Fig. 3- Weights obtained from Entropy and AHP methods
 شکل ۳- مقدار وزن حاصل از روش‌های آنتروپی و AHP

شکل ۶ دسته‌بندی نمونه‌ها در هر روش را در قالب نمودار دایره‌ای نشان می‌دهد. همچنین، نقشه پراکندگی نمونه‌های متعلق به دسته‌بندی‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. در روش Entropy-WQI فقط ۲ دسته نمونه‌های با کیفیت خوب (۸۲ درصد از نمونه‌ها) و نمونه‌های با کیفیت متوسط (۱۸ درصد از نمونه‌ها) دیده می‌شود (شکل ۶a). نمونه‌های ۲۵، ۳۲، ۳۳، ۲۳، ۶ و ۳۰ جزء دسته متوسط هستند و سایر نمونه‌ها در دسته خوب قرار دارند (شکل ۷a). در روش AHP-WQI نمونه‌ها در ۳ دسته بسیار خوب (۳۰ درصد از نمونه‌ها)، خوب (۵۵ درصد از نمونه‌ها) و متوسط (۱۵ درصد از نمونه‌ها) جای می‌گیرند (شکل ۶b). نمونه‌های ۱۳، ۱۲، ۳۲، ۱۵، ۱۷، ۱۱، ۱۶، ۳۳، ۴ و ۸ در دسته بسیار خوب، نمونه‌های ۲۸، ۲۱، ۲۵، ۶ و ۲۳ در دسته متوسط و سایر نمونه‌ها در دسته خوب قرار دارند (شکل ۷b). در روش Entropy-TOPSIS، ۵ دسته برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده است که ۱۵ درصد نمونه‌ها در دسته بسیار خوب (نمونه‌های ۳۲، ۳۳، ۱۳، ۱۲ و ۱۱)، ۳۷ درصد از نمونه‌ها در دسته خوب (نمونه‌های ۴، ۲۰، ۱۶، ۱۷، ۸، ۷، ۳۰، ۱، ۱۵، ۳، ۱۹ و ۹)، ۳۶ درصد از نمونه‌ها در دسته متوسط (نمونه‌های ۲۲، ۱۸، ۱۴، ۲۴، ۲۹، ۱۰، ۵، ۲۷، ۲۶، ۳۱ و ۲)، ۹ درصد از نمونه‌ها در دسته ضعیف (نمونه‌های ۶، ۲۵ و ۲۱) و ۳ درصد از نمونه‌ها در دسته بسیار ضعیف (نمونه ۲۳) واقع شده‌اند (شکل‌های ۶c و ۷c). در روش AHP-TOPSIS، ۴ دسته برای نمونه‌ها قابل تعریف است که ۱۵ درصد از نمونه‌ها در دسته بسیار خوب (نمونه‌های ۱۳، ۱۲، ۳۲، ۱۱ و

۳۳ میانگین ۳۳ نمونه از ۱ تا ۳۱ به دست آمده است که نمونه‌های ۱۸ و ۲۴ هر دو در جایگاه مشترک و در رده میانگین ۱۸ قرار دارند. رده میانگین ۱ به نمونه ۱۳ و رده میانگین ۳۱ به نمونه ۲۳ تعلق دارد. شکل ۴ نمودار دو متغیره رده‌بندی حاصل از روش‌ها را در مقابل رده میانگین نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R^2) بین رده میانگین نمونه‌ها و رده‌های حاصل از هر یک از روش‌های Entropy-WQI، AHP-WQI، Entropy-TOPSIS و AHP-TOPSIS به ترتیب برابر ۰/۳۵، ۰/۸۵، ۰/۸۶ و ۰/۹ می‌باشد. طبق یافته‌های Zahedi et al. (2017) مقدار R^2 بالاتر قابلیت بیشتر آن روش در رده‌بندی نمونه‌های آب را نشان خواهد داد.

شکل ۵ غلظت پارامترهای مورد استفاده در روش‌ها را به همراه مقدار استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2017) نشان می‌دهد. نمونه ۲۳، نمونه‌ای است که از نظر TDS، Na، Cl و SO_4 مقداری فراتر از استاندارد سازمان جهانی بهداشت دارد و این نیز در رده‌بندی حاصل از روش‌های Entropy-TOPSIS، AHP-WQI، Entropy-TOPSIS و AHP-TOPSIS آشکار گشته است و به عنوان نمونه‌ای با کیفیتی پایین‌تر از سایر نمونه‌ها شناخته می‌شود. نمونه ۱۳ نیز از نظر Na، Cl و SO_4 کمترین غلظت را در بین نمونه‌ها دارد و سبب شده است که از دید روش‌های AHP-TOPSIS و AHP-WQI به عنوان بهترین نمونه تلقی شود.

Bao et al. (2020) در مورد بررسی صحت دسته‌بندی‌های انجام شده در شاخص‌های کیفی حاصل از آنتروپی صورت گرفته است. طبق نتیجه‌گیری به دست آمده بیان کرده‌اند که آنتروپی در شرایط خاص قادر به وزن‌دهی منطقی نیست مانند شرایطی که داده‌های پارامتری از مقادیری برخوردار باشد که مشابه مقدار حداکثری این پارامتر است. در چنین مواردی روش آنتروپی چنین پارامترهایی را به عنوان پارامترهای تأثیرگذار معرفی می‌کند و شانس وزن بالا را از سایر پارامترها سلب می‌کند و در نهایت سبب تناقضات و نادرستی در دسته‌بندی کیفی آب می‌شود.

۳۰ درصد از نمونه‌ها در دسته خوب (نمونه‌های ۱۷، ۱۶، ۴، ۲۰، ۸، ۳، ۳۰، ۱۵، ۷ و ۲۴)، ۳۴ درصد از نمونه‌ها در دسته متوسط (نمونه‌های ۲۲، ۱۹، ۱۰، ۲، ۲۹، ۱، ۱۴، ۲۷، ۱۸، ۹ و ۲۶) و ۲۱ درصد از نمونه‌ها در دسته ضعیف (نمونه‌های ۵، ۲۸، ۳۱، ۲۱، ۶، ۲۵ و ۲۳) جای دارند (شکل‌های ۶d و ۷d).

با مقایسه روش‌ها از نظر وزن‌دهی متوجه می‌شویم که وزن‌دهی در روش‌های AHP-WQI و AHP-TOPSIS بهتر از Entropy-WQI و Entropy-TOPSIS صورت گرفته است. مطالعه‌ای توسط

Table 4- The final values in each method for the samples along with their respective rank and average rank
جدول ۴- مقدار نهایی هر یک از روش‌ها برای نمونه‌ها به همراه رده مربوطه و رده میانگین آن‌ها

Sample	Average rank	Entropy-WQI		AHP-WQI		Entropy-TOPSIS		AHP-TOPSIS	
		Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank
1	13	36.42	8	35.55	18	0.74	13	0.61	21
2	19	35.36	5	46.13	26	0.56	28	0.62	19
3	9	31.86	2	31.39	16	0.72	15	0.72	11
4	3	29.08	1	22.78	9	0.82	6	0.78	8
5	24	46.94	22	45.36	25	0.63	24	0.50	27
6	30	65.25	32	68.83	32	0.48	30	0.48	31
7	14	47.16	23	26.53	13	0.77	11	0.70	14
8	11	45.80	20	22.78	10	0.78	10	0.74	10
9	22	49.30	25	34.99	17	0.69	17	0.56	25
10	21	40.05	14	47.99	28	0.63	23	0.66	18
11	5	39.88	13	20.81	6	0.86	5	0.87	4
12	2	41.05	15	15.90	2	0.87	4	0.87	2
13	1	38.46	11	14.70	1	0.88	3	0.89	1
14	17	42.39	17	26.62	14	0.65	20	0.57	22
15	7	36.16	7	20.75	4	0.74	14	0.70	13
16	4	32.27	3	21.87	7	0.81	8	0.80	7
17	3	32.40	4	20.80	5	0.80	9	0.80	6
18	18	36.10	6	47.09	27	0.67	19	0.57	24
19	12	37.69	10	29.65	15	0.71	16	0.68	17
20	8	38.51	12	25.64	11	0.82	7	0.77	9
21	28	46.90	21	56.14	30	0.46	32	0.48	30
22	15	37.18	9	39.25	20	0.68	18	0.68	16
23	31	64.86	31	84.07	33	0.30	33	0.43	33
24	18	41.88	16	45.35	24	0.65	21	0.70	15
25	29	52.79	28	59.71	31	0.47	31	0.44	32
26	25	49.63	27	42.12	22	0.59	26	0.53	26
27	23	44.96	19	42.26	23	0.60	25	0.57	23
28	27	48.38	24	51.64	29	0.52	29	0.49	28
29	20	44.87	18	37.07	19	0.64	22	0.61	20
30	16	77.77	33	26.13	12	0.76	12	0.71	12
31	26	49.55	26	40.51	21	0.57	27	0.49	29
32	6	53.18	29	18.80	3	0.89	1	0.87	3
33	10	54.05	30	22.30	8	0.88	2	0.86	5

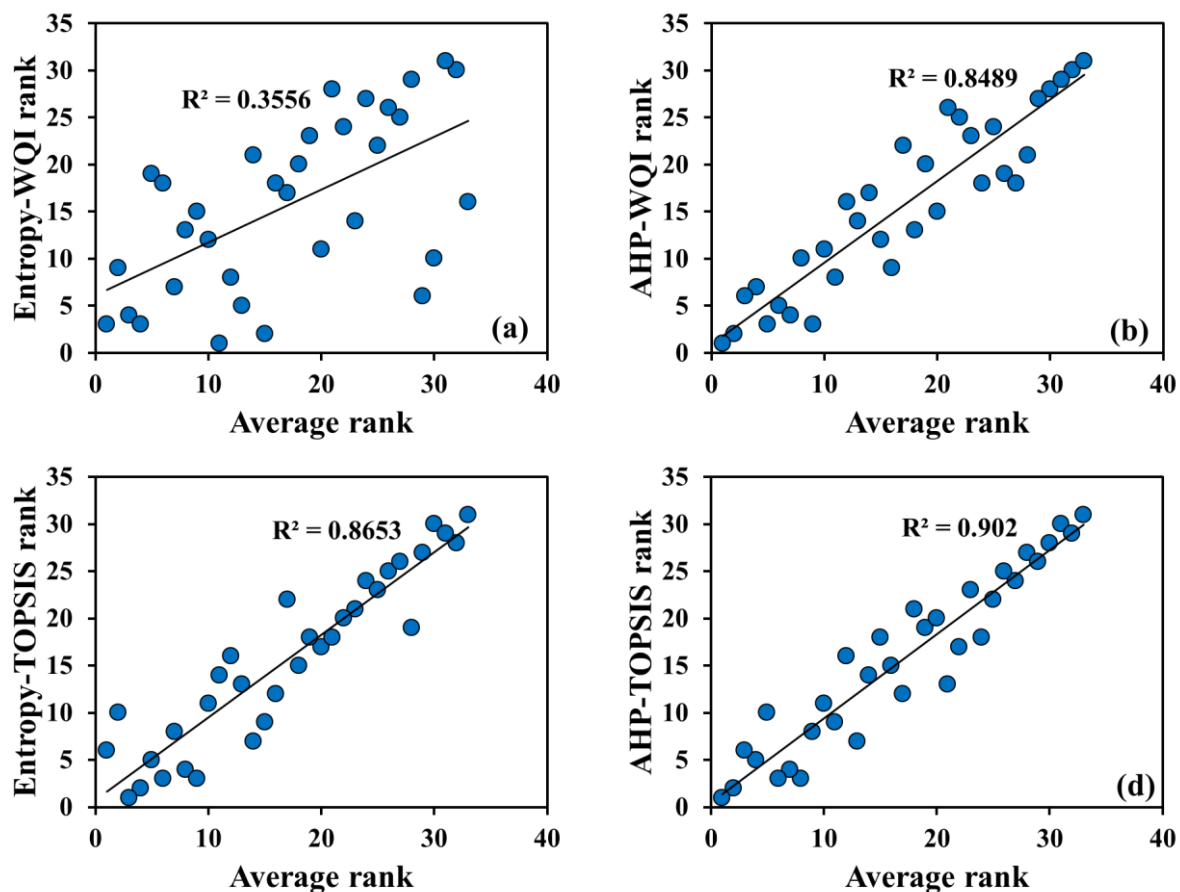


Fig. 4- The bivariate diagram of ranking results from the methods versus average rank

شکل ۴- نمودار دو متغیره رده‌بندی حاصل از روش‌ها در مقابل رده میانگین

با نگاهی بر دسته‌بندی نمونه‌ها می‌توان پی‌برد که روش وزن‌دهی و رتبه‌دهی هر دو در دسته‌بندی مؤثر هستند. از نظر وزن‌دهی کاربرد AHP سبب شده است که دسته‌بندی در Entropy-WQI از ۲ دسته به ۳ دسته در AHP-WQI ارتقاء یابد. از نظر رتبه‌دهی نیز مشخص است که استفاده از TOPSIS سبب تکامل دسته‌بندی کیفیت نمونه‌ها و افزایش اطمینان نسبت به روش‌هایی است که در آن به جای WQI از TOPSIS برای رتبه‌دهی استفاده شده است. رتبه‌دهی WQI بدون نرمال‌سازی داده‌ها و با در نظر گرفتن مقادیر تعریف شده توسط سازمان جهانی بهداشت انجام می‌شود در صورتی که TOPSIS به صورت دقیق‌تر با نرمال‌سازی داده‌ها، تعیین گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی و اندازه‌گیری میزان فاصله از این گزینه‌ها به رتبه‌دهی نمونه‌ها می‌پردازد. ترکیب آنتروپی با TOPSIS نسبت به ترکیب آن با WQI نتایج بهتری داشته است چراکه بسیاری از رده‌بندی و دسته‌بندی غیراصولی و کلی در Entropy-WQI را برطرف کرده است.

شرایط تقریباً مشابه این مسأله در این منطقه مورد مطالعه رخ داده است. پارامتر pH بر حسب روش وزن‌دهی آنتروپی مهم‌ترین پارامتر معرفی شده است اما در صورتی که این پارامتر از نظر پراکندگی گسترده نیست و بنا به منطق آنتروپی شرایط پارامتری با وزن بالا را دارا نیست. با نگاهی به جدول ۳ و شکل ۵a می‌توان دریافت که حداکثر و حداقل مقدار pH برابر ۷/۳۷ و ۹/۵۵ بوده است و سایر نمونه‌ها نیز مقادیر مشابه این اعداد حتی خیلی نزدیک به مقدار حداقل را دارند. از آنجایی که pH در آنتروپی به عنوان یک شاخص مثبت از طریق رابطه ۳ نرمال می‌شود نزدیکی اعداد به مقدار حداقل سبب کوچک شدن صورت کسر نسبت به مخرج کسر می‌شود و در نهایت جوابی با مقدار اندک حاصل خواهد شد. مشخص است هر چه اعداد نرمال شده پارامتر کوچک باشند منجر به پارامتری با عدد آنتروپی کوچک اما با وزن بزرگ خواهند شد.

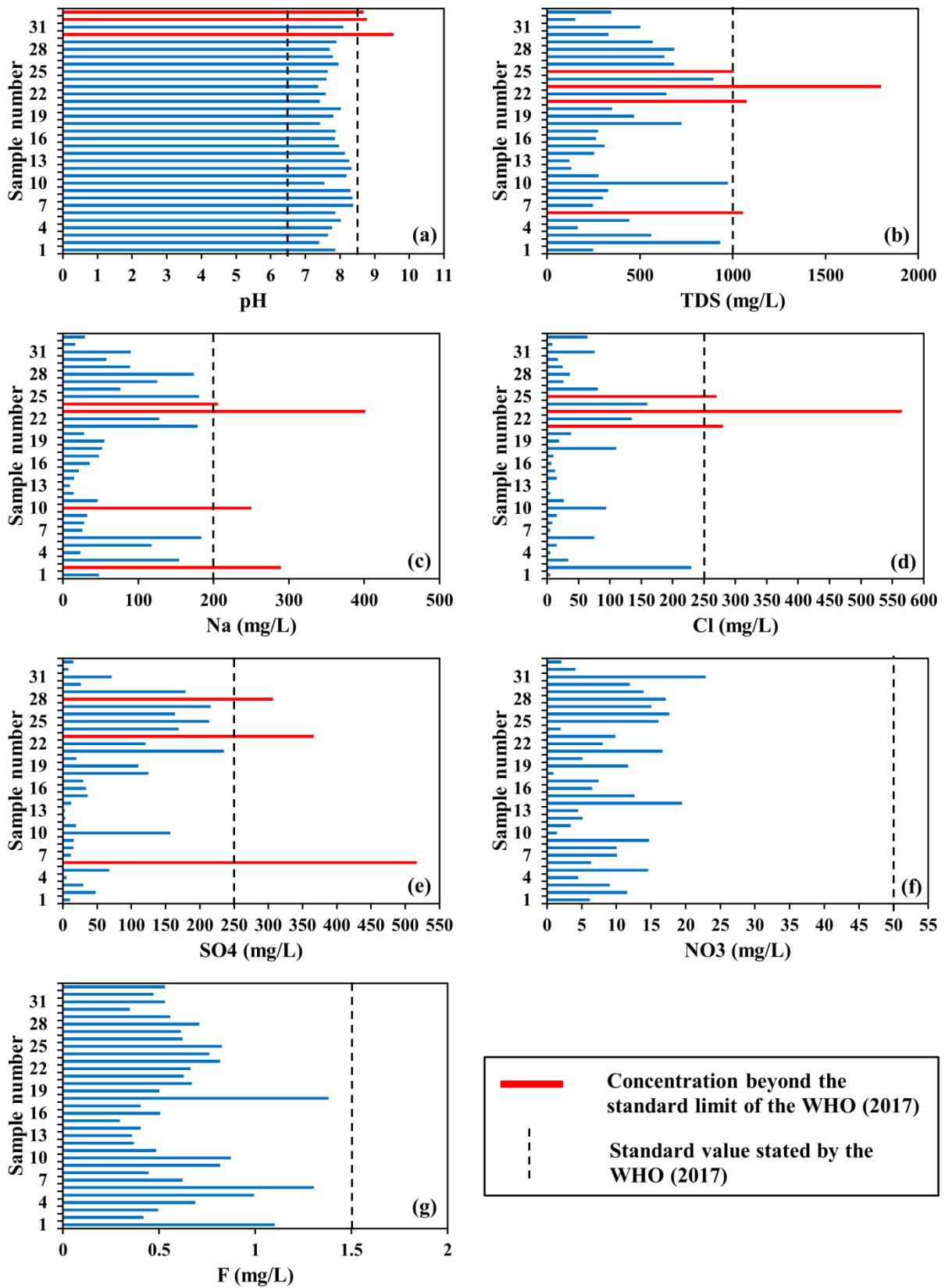
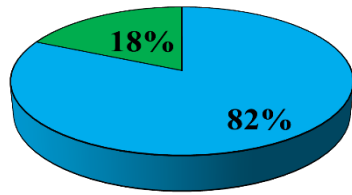
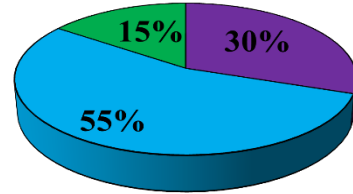


Fig. 5- The concentration of the samples in the parameters used in the water quality investigation

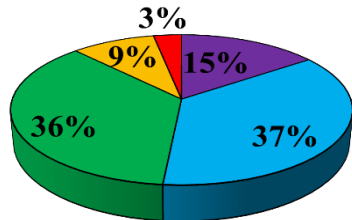
شکل ۵- غلظت نمونه‌ها در پارامترهای مورد استفاده در بررسی کیفیت آب



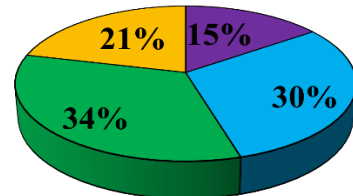
Entropy-WQI (a)



AHP-WQI (b)



Entropy-TOPSIS (c)

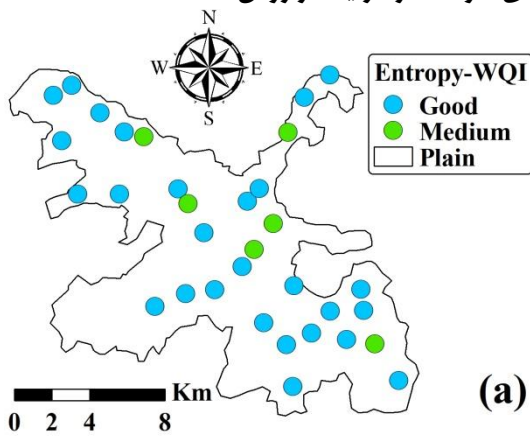


AHP-TOPSIS (d)

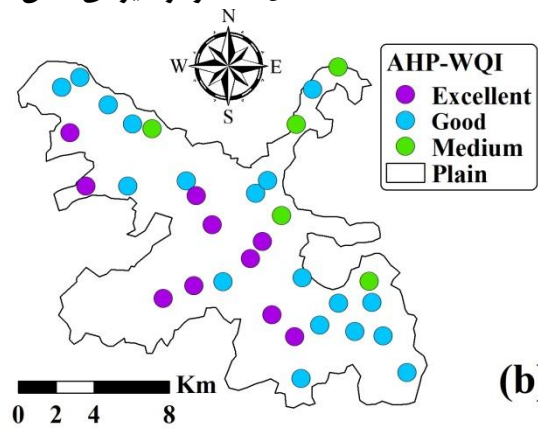


Fig. 6- Pie diagram showing the classification of samples in each of the methods

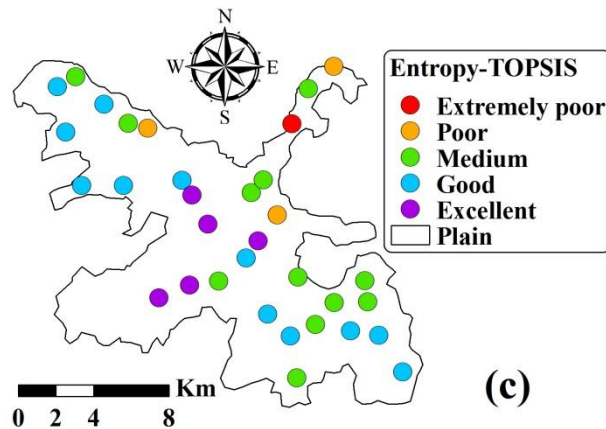
شکل ۶- نمودار دایره‌ای نشان‌دهنده دسته‌بندی نمونه‌ها در هر یک از روش‌ها



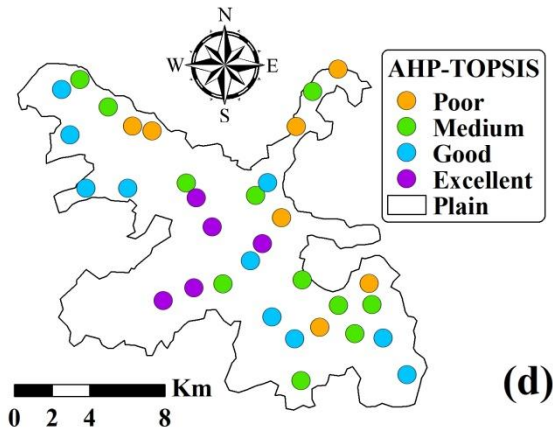
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7- Spatial distribution of samples in each of the methods

شکل ۷- نقشه پراکنده‌گی مکانی نمونه‌ها در هر یک از روش‌ها

نرمال‌سازی داده‌ها، تعیین گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی و اندازه‌گیری میزان فاصله از این گزینه‌ها از روش کلاسیک WQI برتر است. از این روش Topsis سبب تکامل دسته‌بندی کیفیت نمونه‌ها و افزایش اطمینان نسبت به رتبه‌دهی شده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Water Quality Index
- 2- Multiple Criteria Decision Making
- 3- Analytical Hierarchy Process
- 4- Technique of Order Preference by Similarity to Ideal Solution
- 5- Compromise Programming
- 6- Cochran

به کارگیری Topsis سبب شده است تا دسته‌بندی در Entropy- WQI از ۲ دسته موجود در Entropy-WQI به ۵ دسته در ارتقاء یابد. این بهبود وضعیت در ترکیب Topsis با AHP نیز مشاهده می‌شود به گونه‌ای که ۳ دسته‌بندی در AHP-WQI وجود دارد؛ اما تعداد دسته‌بندی در AHP-Topsis، ۴ دسته است.

۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه روش‌های ترکیبی Entropy-WQI، AHP-WQI، Entropy-Topsis و AHP-Topsis برای بررسی کیفیت ۳۳ نمونه از نظر پارامترهای pH، TDS، Na، SO₄، Cl، NO₃ و F به کار گرفته شدند. در روش وزن‌دهی آنتروپی، pH مهم‌ترین و Cl کم اهمیت‌ترین پارامتر بودند در حالی که در روش AHP، F مهم‌ترین و pH کم اهمیت‌ترین پارامتر در نظر گرفته شدند.

ضریب تعیین (R^2) بین رده میانگین نمونه‌ها و رده‌های حاصل از هر یک از روش‌ها نشان داد که روش AHP-Topsis توانایی بالایی در رده‌بندی و دسته‌بندی نمونه‌های آب دارد. رده میانگین ۳۳ نمونه از ۱ تا ۳۱ به دست آمده است که رده میانگین ۱ به نمونه ۱۳ (واقع در جنوب دشت و نزدیک دامنه‌های سهند) و رده میانگین ۳۱ به نمونه ۲۳ (واقع در شمال دشت و نزدیک مسیر پایان جریان) تعلق دارد. نمونه ۲۳، نمونه‌ای است که از نظر TDS، Na، Cl و SO₄ مقداری فراتر از استاندارد سازمان جهانی بهداشت دارد و نمونه ۱۳ نیز از نظر Cl، Na، Cl و SO₄ کمترین غلظت را در بین نمونه‌ها دارد. در روش Entropy-WQI فقط ۲ دسته کیفیت خوب و کیفیت متوسط برای نمونه‌ها وجود دارد. در روش AHP-WQI نمونه‌ها در ۳ دسته بسیار خوب، خوب و متوسط جای می‌گیرند. در روش Entropy-Topsis، ۵ دسته بسیار خوب، خوب، متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. در روش AHP-Topsis، ۴ دسته بسیار خوب، خوب، متوسط و ضعیف برای نمونه‌ها قابل تعریف است.

دسته‌بندی کیفی نمونه‌ها نشان می‌دهد که روش وزن‌دهی و رتبه‌دهی هر دو در دسته‌بندی مؤثر هستند. با مقایسه روش‌ها از نظر وزن‌دهی روشن شد که روش AHP بهتر از آنتروپی بوده است؛ چراکه وزن‌دهی در روش‌های AHP-WQI و AHP-Topsis بهتر از Entropy-WQI و Entropy-Topsis صورت گرفته است. نتایج نشان داد که روش آنتروپی در خصوص مقادیر مشابه و نزدیک به مقدار حداقل شاخص‌های مثبت یعنی پارامترهایی که رابطه مستقیم با آنتروپی دارد دچار خطا می‌شود. از نظر رتبه‌دهی روش Topsis به دلیل

۶- مراجع

- Amiri V, Rezaei M, and Sohrabi N (2014) Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences* 72(9):3479–3490
- Asghari Moghaddam A and Vadiati M (2016) Groundwater quality ranking of sarab plain for drinking purpose using entropy method. *Water and Soil Science* 26(3–2):1–13 (In Persian)
- Baby S (2013) AHP Modeling for Multicriteria Decision-Making and to Optimise Strategies for Protecting Coastal Landscape Resources. *International Journal of Innovation, Management and Technology* 4(2):218–227
- Bao Q, Yuxin Z, Yuxiao W and Feng Y (2020) Can Entropy Weight Method Correctly Reflect the Distinction of Water Quality Indices? *Water Resources Management. Water Resources Management* 34(11):3667–3674
- Brown RM, McClelland NI, Deininger RA, and Tozer RG (1970) A Water Quality Index—Do We Dare. *Water Sewage Works* 117:339–343
- Goodarzi MR, Abedi MJ, Niknam ARR, and Heydaripour M (2022) Groundwater quality status based on a modification of water quality index in an arid area, Iran. *Water Supply* 22(7):6245–6261
- Gorgij AD, Kisi O, Asghari Moghaddam A, and Taghipour A (2017) Groundwater quality ranking for drinking purposes, using the entropy method and the spatial autocorrelation index. *Environmental Earth Sciences, Springer Berlin Heidelberg* 76(7):269
- Gorgij AD, Wu J, and Asghari Moghadam A (2019) Groundwater quality ranking using the improved entropy TOPSIS method: A case study in Azarshahr plain aquifer, east Azerbaijan, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment, Taylor & Francis* 25(1–2):176–190
- Hwang C-L and Yoon K (1981) Methods for multiple attribute decision making. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, Berlin, Heidelberg*, 58–191. 9_3
- Li C, Gao Z, Chen H, Wang J, Liu J, Li C, Teng Y, Liu C, and Xu C (2021) Hydrochemical analysis and quality assessment of groundwater in southeast North China Plain using hydrochemical, entropy-weight water quality index, and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences, Springer Berlin Heidelberg* 80(16):523
- Li P, Feng W, Xue C, Tian R, and Wang S (2017) Spatiotemporal variability of contaminants in lake water and their risks to human health: A Case Study of the Shahu Lake Tourist Area, Northwest China. *Exposure and Health, Springer Netherlands* 9(3):213–225
- Li P, He S, Yang N, and Xiang G (2018) Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes in Yan'an City, northwest China: Implications to sustainable groundwater quality management on the Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg* 77(23):775
- Li P, Wu J, and Qian H (2012) Groundwater quality assessment based on rough sets attribute reduction and TOPSIS method in a semi-arid area, China. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(8):4841–4854
- Liu Z, Zhu H, Cui X, Wang W, Luan X, Chen L, Cui Z, and Zhang L (2021) Groundwater quality evaluation of the dawu water source area based on water quality index (WQI): Comparison between Delphi method and multivariate statistical analysis method. *Water, Multidisciplinary Digital Publishing Institute* 13(8):1127
- Mazor E (2003) Chemical and isotopic groundwater hydrology. *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. CRC Press*
- Melillo P and Pecchia L (2016) What is the appropriate sample size to run analytic hierarchy process in a survey-based research? *International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, London*, 1–2
- Moridi A, Kerachian R, and Zokaei M (2017) Assessment of Iran's water resources quality (2004-2014). *Iran-Water Resources Research* 12(4):23–35 (In Persian)
- Pakniya V (2015) Evaluation of hydrogeochemistry of Bostan Abad plain aquifer groundwater resources. M.Sc. Thesis. *Natural Sciences, University of Tabriz*, 182 (In Persian)
- Rashid Sorkh Abadi M, Shahidi A, and Khashei A (2014) Spatial analysis of groundwater quality for drinking use on Zaveh plain with Geographic Information System and Analytical Hierarchy Process combination. *Irrigation and Water Engineering* 5(1):96–109 (In Persian)
- Saaty TL (1980) *The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, New York*
- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27:379–423
- Shyu G-S, Cheng B-Y, Chiang C-T, Yao P-H, and Chang T-K (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 Research and Public Health, Molecular Diversity Preservation International* 8(4):1084–1109
- Soltani S and Asghari Moghaddam A (2021) Hydrogeochemical study of groundwater resources in Bostanabad plain using multivariate statistical methods. *Iranian Journal of Ecohydrology* 8(3):691–706 (In Persian)
- Soltani S, Asghari Moghaddam A, Barzegar R, Kazemian N and Tziritis E (2017) Hydrogeochemistry and water quality of the Kordkandi-Duzduzan plain, NW Iran: application of multivariate statistical analysis and PoS index. *Environmental Monitoring and Assessment. Springer International Publishing* 189(9):455
- Subba Rao N, Sunitha B, Adimalla N, and Chaudhary M (2020) Quality criteria for groundwater use from a rural part of Wanaparthy District, Telangana State, India, through ionic spatial distribution (ISD), entropy water quality index (EWQI) and principal component analysis (PCA). *Environmental Geochemistry and Health* 42(2):579–599
- Tavakkoli M, Fazelnia G, and Ganjali AA (2018) The application of analytical hierarchy process in setting the priorities of economic sectors in Iran: A case study of Neishabour County, Village and Development 12(4):77–98 (In Persian)
- WHO (2017) Guidelines for drinking-water quality. 4th edition, Incorporating the 1st Addendum
- Yousefi H, Zahedi S, and Niksokhan MH (2018) Modifying the analysis made by water quality index using multi-criteria decision making methods. *Journal of African Earth Sciences. Elsevier Ltd* 138:309–318
- Zahedi S, Azarnivand A, and Chitsaz N (2017) Groundwater quality classification derivation using Multi-Criteria-Decision-Making techniques. *Ecological Indicators. Elsevier Ltd* 78:243–252
- Zhang Y, Li X, Luo M, Wei C, Huang X, Xiao Y, Qin L, and Pei Q (2021) Hydrochemistry and entropy-based groundwater quality assessment in the suining area, Southwestern China. *Journal of Chemistry* 2021:1–11