نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۳، مرداد - شهریور ۱۳۹۸، ص. ۷۱۴-۶۹۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 13, Agu.-Sept. 2019, p. 699-714

روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس با آنتروپی برای رتبه‌بندی کیفیت و ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی

اکرم سیفی[1*]، فاطمه سروش[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۴

چکیده

در این مطالعه، کیفیت شرب آب زیرزمینی ۳۶ چاه واقع در آبخوان شهربابک و رتبه‌بندی چاه‌های آب با استفاده از دو روش شاخص کیفیت آب (WQI) و روش جدید ترکیبی TOPSIS با تئوری آنتروپی (ETOPSIS) بررسی شده است. در فرآیند محاسبه WQI، معمولاً از وزن‌های تجربی برای هر پارامتر شیمیایی استفاده می‌شود و پارامترهای دارای وزن‌های کم و غلظت‌های زیاد و یا برعکس، ارزش ارزیابی را کاهش می‌دهند و به همین دلیل روش ترکیبی ETOPSIS تدوین شده است. در روش ETOPSIS، وزن هر پارامتر با روش وزن‌دهی آنتروپی محاسبه و با نرمال‌سازی همه پارامترهای شیمیایی مورد استفاده، تأثیر همه پارامترها در رتبه کیفی چاه‌ها لحاظ می‌شود. همچنین در این مطالعه، اولویت‌بندی ریسک آلودگی چاه‌ها با استفاده از دو متغیر توالی زمانی هفت ساله آلودگی و احتمال آلودگی انجام شده است. با توجه به نتایج WQI بر اساس استاندارد ۱۰۵۳، بیش از ۸ و ۱۷ درصد چاه‌ها به ترتیب در طبقات عالی و خوب قرار گرفتند. با روش ETOPSIS، چاه شماره ۱۱ در رتبه اول کیفیت آب (TC= ۰/۹۵) قرار گرفت و کمترین ریسک آلودگی را نشان داد اما با روش WQI، این چاه در رتبه چهارم و طبقه خوب (WQI= ۵۴/۴) قرار گرفت. بررسی پارامترهای شیمیایی، صحت نتایج ETOPSIS را تأیید کردند. محاسبات وزن‌دهی آنتروپی نشان دادند که پارامترهای غلظت منیزیم و بی‌کربنات با وزن ۰/۱۷ بیشترین تأثیر و پارامتر اسیدیته با وزن ۰/۰۵ کمترین اثر را بر رتبه‌بندی ETOPSIS در آبخوان مورد مطالعه دارند. ریسک آلودگی در قسمت‌های شرقی منطقه کم و با حرکت به سمت غرب و جنوب غربی، ریسک آلودگی زیاد و خطرناک شد. رتبه‌های ریسک آستانه ۵۰ درصد آلودگی حاصل از WQI و ETOPSIS با ضریب تعیین ۰/۹۵۱ به یکدیگر همبسته بودند. طبق نتایج، کاربرد ETOPSIS می‌تواند نتایج مفید و قابل اطمینان‌تری نسبت به WQI بدست دهد و قابل توصیه در مناطق دیگر است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان شهربابک، اولویت‌بندی، پهنه‌بندی، توالی زمانی آلودگی، شاخص کیفیت آب

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آبی موجود در کره زمین هستند که به مقدار زیادی توسط انسان و به واسطه فعالیت‌های کشاورزی، شرب و صنعت به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chitsaz and Azarivand, 2017). به طور کلی، رشد جمعیت شهرنشینی، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در کشورهای در حال توسعه، سبب افزایش تقاضای ناپایدار آب و در نتیجه افزایش مصرف آب از آبخوان‌های طبیعی شده است (Li et al., 2015; Krishan et al., 2016). افزایش تقاضا و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بر مقدار کمی و کیفی آب‌ها تأثیر گذاشته و منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ی سطح آب‌های زیرزمینی و همچنین کاهش کیفیت این آب‌ها شده است (Srinivas et al., 2015). آلودگی آب‌های زیرزمینی به دلیل فعالیت‌های شدید انسانی و تغییرات زیست محیطی روز به روز بیشتر و جدی‌تر شده است، بنابراین ارزیابی آب‌های زیرزمینی، بر دو جنبه بررسی کمی و کیفی منابع آب متمرکز شده و بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی همانند کمیت آنها دارای اهمیت زیادی است (Li et al., 2012). کیفیت آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر بارش، آب‌های سطحی و فرآیندهای ژئوشیمیایی زیرسطحی قرار می‌گیرند (Vasanthavigar et al., 2010) و آلودگی آنها به عنوان تهدیدی برای سلامت انسان، توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی محسوب می‌شود (Milovanovic, 2007).

در سال‌های اخیر، ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی به عنوان یک عامل اساسی در ارزیابی آبخوان‌ها، توجه بسیاری را در سطح ملی و بین‌المللی به خود جلب کرده است. بهبود روش‌ها و شبکه‌های کنترل آب‌های زیرزمینی، تأثیر مثبتی بر حفاظت کیفی این آب‌ها دارد. با افزایش آگاهی درباره حفاظت کیفی منابع آب و نیاز به ارزیابی کیفیت

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.seifi@vru.ac.ir)

آب‌ها، تعداد زیادی شاخص و روش ارزیابی کیفی آب توسعه داده شده است. بر اساس آمار، بیش از ۶۰ روش ارزیابی کیفی آب توسعه یافته است که هر روش دارای مزایا و معایبی می‌باشد و بنابراین تصمیم-گیری درمورد اینکه کدام روش بهترین گزینه برای بررسی کیفیت آب‌ها است، سخت می‌باشد (Li et al., 2012). شاخص کیفیت آب[1] (WQI) که توسط Brown و همکاران (۱۹۷۰) توسعه داده شده است، به طور گسترده‌ای در اغلب کشورها و توسط محققان مختلف استفاده می‌شود (Chaturvedi et al., 2008; Vasanthavigar et al., 2010; Sadat-Noori et al., 2013; Hosseini-Moghari et al., 2015; Zahedi et al., 2017). از طرفی، برخی محققان معتقدند که این روش دارای نقایص ساختاری است که مانع از دستیابی این شاخص به نتایج مطلوب می‌شود (Lermontov et al., 2009). طبق تحقیق داهیا و همکاران (۲۰۰۷)، استفاده از این شاخص در برخی شرایط، نتایج غیرقابل قبولی را ارائه کرده است. به عنوان مثال، ممکن است بر اساس تجزیه و تحلیل WQI، نمونه آبی دارای کیفیت مناسب برای اهداف شرب گزارش شود در حالی‌که همان نمونه با استفاده از دیاگرام ویلکاکس به عنوان آبی نامناسب برای کشاورزی معرفی شود. این نتایج، متناقض با استانداردهای ارائه شده برای آب آشامیدنی و کشاورزی می‌باشند (Dahiya et al., 2007). شاخص WQI، بر اساس مجموع وزن‌های نسبی هر پارامتر شیمیایی محاسبه می‌شود. در نتیجه، مقادیر زیاد WQI، برای یک چاه می‌تواند در نتیجه غلظت زیاد یکی از پارامترهای شیمیایی باشد که وزن بیشتری را به خود اختصاص داده است. اما اگر در چاهی غلظت عنصری که وزن بیشتری دارد، کم باشد و پارامترهایی با وزن کمتر، مقادیر غلظت بیشتری داشته باشند، شاخص WQI کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تغییر در اهمیت هر یک از پارامترها می‌تواند بطور معکوس و قابل ملاحظه‌ای بر نتایج طبقه‌بندی تأثیر بگذارد که این امر می‌تواند به دلیل وزن‌های نسبی غیرواقعی اختصاص یافته به هر پارامتر شیمیایی باشد (Zahedi et al., 2017). بنابراین ملاحظه می‌شود که استفاده از روش WQI همواره با عدم اطمینان و شک و تردید روبروست و تحت تاثیر قضاوت‌های تجربی و فردی قرار می‌گیرد. به همین دلیل از روش تئوری آنتروپی[2] می‌توان به عنوان روشی مفید در تعیین وزن پارامترهای کیفی آب استفاده کرد. در تحقیقی، پی- یو و همکاران (۲۰۱۰) از روش وزن‌دهی آنتروپی WQI به منظور بهبود ارزیابی‌های این شاخص استفاده کردند و بررسی‌های آنها نشان داد که WQI وزن‌دهی شده با آنتروپی، می‌تواند نتایج قابل قبول‌تری را ایجاد کند (Pei-Yue et al., 2010). استفاده از روش WQI با وزن‌دهی آنتروپی برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در Jingyuan نشان داد که این روش نتایجی متناسب با ارزیابی‌های مزرعه‌ای ایجاد کرده است (Jianhua et al., 2011). در تحقیق دیگری در این زمینه، امیری و همکاران (۲۰۱۴) وزن‌های لازم برای پارامترهای شیمیایی در روش WQI را با تئوری آنتروپی (EWQI) محاسبه و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی را برای ۵۹ نمونه آب در دو فصل خشک و تر در منطقه لنجانات ایران انجام دادند. نتایج آنها بیانگر قابلیت زیاد EWQI در تشخیص کیفیت آب منطقه مورد بررسی بود (Amiri et al., 2014).

با توجه به مطالب ذکر شده، توسعه روشی مؤثر، به منظور مقابله با مشکلات فوق‌الذکر و همچنین برای تصمیم‌گیری واقعی و منعطف در ارزیابی کیفیت آب ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین برای جلوگیری از بروز چنین تضادهایی در طبقه‌بندی کیفی آب‌ها، محققان استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[3](MCDM) را پیشنهاد داده و بیان کرده‌اند که کاربرد روش‌های MCDM در بحث کیفیت آب، نتایج قابل توجهی را ارائه می‌کند (Mladenović-Ranisavljević, 2012; Mutikanga et al., 2011; Talukder et al., 2017). از تلفیق روش WQI و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره PROMETHEE به منظور ارزیابی کیفی آب رودخانه دانوب استفاده شد. محققان بیان کردند که روش ترکیبی پیشنهادی جزئیات بیشتری را برای مدیریت کیفی آب در اختیار تصمیم‌گیرنده‌ها قرار می‌دهد و در نتیجه فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب نقاط بحرانی از نظر کیفیت آب ساده‌تر است (Mladenović-Ranisavljević et al., 2018).

روش TOPSIS[4] یکی از روش‌های MCDM است که در طول ۳۰ سال گذشته در مطالعات مختلفی در سرتاسر جهان به منظور حل مسائل تصمیم‌گیری در مباحث ارزیابی کیفیت خدمات حمل و نقل (Sadi-Nezhad and Damghani, 2010)، منابع انسانی (Kelemenis and Askounis, 2010)، ارزیابی سیستم مخازن (Afsahr et al., 2011)، منابع آب (Hyde et al., 2005) و کیفیت آب (Li et al., 2011, 2012) استفاده شده است. به منظور بهبود ارزیابی کیفیت شرب آب‌های زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک شمال چین، محققان از ترکیب مدل‌های کاهش مجموعه rough set، TOPSIS و تئوری آنتروپی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که مدل ترکیبی به کار برده شده نتایج معقولی را ارائه می‌دهد. ضمن آنکه محاسبات این مدل ترکیبی، ساده و قابل استفاده تمامی کارشناسان و تصمیم‌گیرندگان است (Li et al., 2011). در مطالعه‌ای، زاهدی و همکاران (۲۰۱۷) از روش‌های TOPSIS و CP[5] به منظور ارزیابی و اعتباریابی کیفیت آب چاه‌های دشت ورامین برای اهداف شرب استفاده کردند. پس از کاربرد روش‌های MCDM مشخص شد که

1-Water quality index
2-Entropy theory

3-Multi-criteria decision making
4-Technique for order preference by similarity toideal solution
5-Compromise Programming

شاخص WQI به ندرت قادر به ارزیابی دقیق کلاس‌های کیفیت آب است و مدل‌های MCDM تحلیل دقیق‌تری انجام می‌دهند (Zahedi et al., 2017). در تحقیقی دیگر از روش‌های MCDM شامل TOPSIS، CP و OWA برای رفع تناقض‌های حاصل از WQI برای ارزیابی آب‌های زیرزمینی منطقه کرج استفاده شد. کاربرد روش‌های MCDM سبب ایجاد تغییرات قابل توجهی در رتبه‌بندی کیفیت آب چاه‌ها برای اهداف شرب شد (Yousefi et al., 2018).

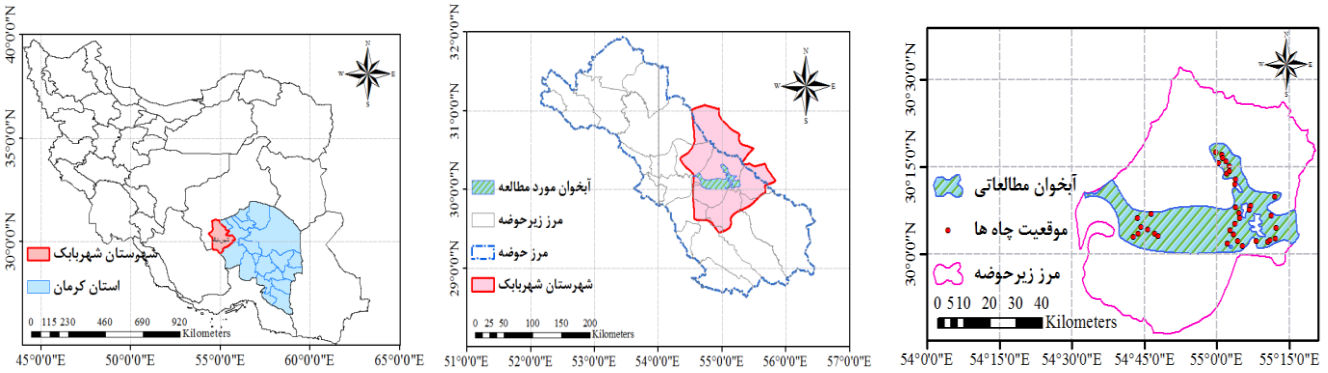
در ایران از آب‌های زیرزمینی به طور اساسی برای اهداف شرب، کشاورزی، مصارف خانگی و صنعتی استفاده می‌شود (Sadat-Noori et al., 2013). بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و همچنین خشکسالی‌های مداوم در ایران، موجب کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح آب آبخوان‌ها شده است (Hosseinifar and Mirzaei Aminiyan, 2015). بنابراین به نظر می‌رسد که تحلیل دقیق کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف شرب و پایش روند تغییرات کیفیت آنها به منظور جلوگیری از ایجاد خطرات سلامت لازم و ضروری است. بررسی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی و روند تغییرات آنها می‌تواند ابزاری مناسب در جهت کسب اطمینان از سلامت آب‌ها و در نتیجه سلامت بشر باشد.

طبق مطالب فوق مشاهده می‌شود که استفاده از روش WQI در تحلیل نتایج کیفیت آب همواره با مقداری عدم قطعیت روبرو است و علاوه براین، وزن و اهمیت پارامترهای کیفی در هر منطقه می‌تواند متفاوت و بر نتایج پهنه‌بندی و ریسک مخاطرات تاثیرگذار باشد. به همین دلیل در این تحقیق، روش ترکیبی تئوری آنتروپی با TOPSIS (ETOPSIS) برای وزن‌دهی پارامترهای کیفی، اصلاح نتایج محاسبه شاخص کیفی و رتبه‌بندی آلودگی چاه‌ها تدوین شده و در تحلیل‌ها استفاده شده است. بنابراین اولین هدف مطالعه حاضر، استفاده از شاخص WQI به منظور تحلیل و رتبه‌بندی نمونه‌های آب چاه‌های منطقه شهربابک می‌باشد. در مرحله بعدی، با اجرای روش تصمیم-گیری چندمعیاره TOPSIS در ترکیب با وزن‌دهی آنتروپی برای بررسی اعتبار کلاس‌های WQI و بررسی تناقض‌های احتمالی در تحلیل‌های WQI استفاده می‌شود. در انتها نیز رتبه‌دهی ریسک و توالی زمانی آلودگی هر یک از چاه‌ها بر اساس رتبه کیفیت حاصل از ETOPSIS و WQI انجام، رتبه‌بندی و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز شهربابک–خاتون‌آباد با وسعت ۳۱۹۷ کیلومترمربع در شمال غربی استان کرمان قرار گرفته است (شکل ۱) که ۶۹ درصد آن را دشت آبرفتی تشکیل می‌دهد. این سفره تأمین‌کننده آب برای مصارف مختلفی همچون محصولات کشاورزی، آب شرب شهرستان شهربابک و شهرها و روستاهای اطراف، صنایع معدن مس سرچشمه، معدن مس میدوک، صنایع جنبی مس و ذوب، معادن فیروزه و کاشی است. دشت شهربابک فاقد جریان دائمی آب‌های سطحی است و جریان‌های فصلی سفره آب زیرزمینی را تغذیه می‌نمایند. در این تحقیق از اطلاعات کیفی مربوط به ۳۶ حلقه چاه واقع در آبخوان شهربابک که در سال ۱۳۸۷ توسط آب منطقه‌ای کرمان نمونه‌برداری شده است، استفاده گردید. پارامترهای آماری مربوط به چاه‌ها و همچنین مقدار مجاز هر پارامتر از استاندارد ۱۰۵۳ سازمان استاندارد ملی ایران و تعداد و درصد چاه‌های دارای مقادیر کیفی کمتر از حد مجاز در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت آبخوان مطالعاتی و چاه‌های مشاهداتی

محاسبه شاخص کیفیت آب

شاخص کیفیت آب (WQI) یک روش رتبه‌دهی است که اثر ترکیبی هر یک از پارامترهای کیفی آب روی کیفیت کلی آب را بیان می‌کند و به صورت عددی واحد ارائه می‌شود. مقدار WQI با محاسبه زیرشاخص‌های مربوطه و وزن‌دهی پارامترهای کیفیت آب محاسبه می‌شود. در این روش، وزن هر پارامتر کیفی، به صورت نسبت معکوس مقدار مجاز پیشنهادی آن پارامتر توسط استانداردها محاسبه می‌شود (Zahedi et al., 2017). در مطالعه حاضر از پارامترهای

SO_4، Cl، HCO_3، pH، TDS، Na، Mg و Ca استفاده شد و بنابراین باید یک فاکتور وزنی به هر یک از این پارامترها اختصاص داده شود. فاکتور وزنی هر پارامتر را می‌توان بر اساس معادله ۱ محاسبه کرد (جدول ۲).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (۱)$$

که w_i و W_i به ترتیب بیانگر وزن و فاکتور وزنی هر پارامتر شیمیایی می‌باشند.

جدول ۱- مشخصات آماری پارامترهای کیفی مورد استفاده

پارامتر	حداکثر (mg/L)	حداقل (mg/L)	میانگین (mg/L)	انحراف استاندارد (mg/L)	حد مجاز (mg/L)	SNBSL†	SPBSL††
SO_4	۲۵۰۵/۶۰	۵۲/۸۰	۶۷۹/۷۳	۵۲۵/۶۰	۴۰۰	۱۳	۳۶/۱۱
Cl	۵۳۲۵	۷۱	۱۱۵۷/۶۰	۱۰۴۲/۰۷	۴۰۰	۸	۲۲/۲۲
HCO_3	۶۷۱/۱۱	۹۱/۵۲	۲۴۶/۴۱	۱۵۴/۱۲	۱۲۰	۲	۵/۵۶
pH	۸	۶/۴۰	۷/۳۳	۰/۳۶	۶/۵ -۹	۳۶	۱۰۰
TDS	۹۶۸۵	۵۰۱	۲۸۲۴/۹۲	۱۸۳۱/۹۶	۱۵۰۰	۹	۲۵
Na	۲۳۸۹/۷۰	۱۰۵/۸۰	۶۷۵/۱۴	۴۸۹/۰۹	۲۰۰	۴	۱۱/۱۱
Mg	۳۰۰	۷/۲۰	۷۶/۷۰	۷۲/۶۹	۱۵۰	۳۱	۸۶/۱۱
Ca	۱۱۰۰	۲۰	۳۰۲/۲۲	۲۲۶/۴۹	۳۰۰	۲۳	۶۳/۸۹

†SNBSL: تعداد چاه‌های دارای مقدار کیفی کمتر از حد مجاز، ††SPBSL: درصد چاه‌های دارای مقدار کیفی کمتر از حد مجاز

رتبه و زیرشاخص کیفی هر پارامتر را می‌توان با معادله‌های ۲ و ۳ محاسبه نمود.

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (۲)$$

$$SI_i = q_i \times W_i \quad (۳)$$

که q_i بیانگر رتبه کیفی هر پارامتر، C_i بیانگر غلظت اندازه‌گیری شده هر پارامتر شیمیایی، S_i بیانگر مقدار مجاز هر پارامتر بر اساس استاندارد و SI_i نیز نشان‌دهنده زیرشاخص کیفی برای هر پارامتر می‌باشند. مقدار مجاز هر پارامتر از استاندارد ۱۰۵۳ سازمان استاندارد ملی ایران بدست آمد.

در نهایت با جمع جبری زیرشاخص‌های کیفی تمام پارمترها، شاخص WQIبرای هر نمونه آب قابل محاسبه است (معادله ۴):

$$WQI = \sum SI_i \quad (۴)$$

پس از محاسبه شاخص WQI طبقه کیفی هر نمونه با استفاده از جدول ۳ مشخص می‌گردد. بر اساس این شاخص، هر نمونه در یکی از طبقات عالی، خوب، ضعیف، خیلی ضعیف و نامناسب برای مصارف شرب انسانی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مقادیر وزنی و فاکتور وزنی هر پارامتر شیمیایی مورد استفاده

پارامتر	SO_4	Cl	HCO_3	pH	TDS	Na	Mg	Ca	مجموع
w_i	۵	۵	۱	۳	۵	۴	۳	۳	$\sum w_i = 29$
W_i	۰/۱۷۲	۰/۱۷۲	۰/۰۳۴	۰/۱۰۳	۰/۱۷۲	۰/۱۳۸	۰/۱۰۳	۰/۱۰۳	$\sum W_i = 1$

جدول ۳- طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس WQI (Yousefi et al., 2018)

دامنه WQI	تفسیر
< ۵۰	عالی
۵۰ – ۹۹/۹۹	خوب
۱۰۰ – ۱۹۹/۹۹	ضعیف
۲۰۰ – ۲۹۹/۹۹	خیلی ضعیف
≥ ۳۰۰	نامناسب

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس

در این تحقیق از روش تاپسیس به عنوان یکی از روش‌های کلاسیک حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره در ترکیب با روش وزن-دهی آنتروپی، به منظور اعتباریابی نتایج حاصل از رتبه‌بندی شاخص

کیفیت آب استفاده شد. روش TOPSIS یکی از روش‌های کلاسیک حل مسائل MCDM است که اولین بار توسط Hwang و Yoon (۱۹۸۱) توسعه داده شد. مراحل اساسی روش TOPSIS در ارزیابی کیفیت آب به صورت زیر می‌باشد (Guo et al., 2008; Sadi-Nezhad and Damghani, 2010; Li et al., 2012):

مرحله ۱- ساخت ماتریس تصمیم اولیه: در این مرحله اگر m نمونه از n پارامتر وجود داشته باشد،می‌توان داده‌ها را در قالب ماتریس زیر بیان کرد (معادله ۵):

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots\ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} \dots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که C بیانگر ماتریس تصمیم اولیه و c_{ij} نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی نمونه‌ها برای $i = 1,2, \dots, m$ و $j = 1,2, \dots, n$ می‌باشند.

مرحله ۲- نرمال‌سازی ماتریس تصمیم اولیه: به دلیل آنکه ممکن است در ماتریس تصمیم اولیه روابط پیچیده‌ای وجود داشته باشد باید این ماتریس استاندارد شود تا ناهنجاری‌های مربوط به واحدهای اندازه‌گیری و مقیاس‌های مختلف حذف شوند. ماتریس تصمیم استاندارد (R) به صورت معادله ۶ و استانداردسازی با معادله ۷ انجام می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots\ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\text{matrix}, r_{ij} = c_{ij} \Big/ \left[\sum_{i=1}^{m} c_{ij}^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

مرحله ۳- تعیین وزن هر پارامتر: به دلیل آنکه هر پارامتر اهمیت متفاوتی در ارزیابی کیفی دارد، وزن هر شاخص با استفاده از تئوری آنتروپی محاسبه می‌شود. بعد از اینکه وزن‌های آنتروپی (ω_j) تعیین شدند، ماتریس استاندارد وزن‌دهی شده F را می‌توان با روابط زیر بدست آورد:

$$f_{ij} = r_{ij} \times \omega_j \quad (۸)$$

$$F = \left(f_{ij}\right)_{m \times n} \quad (۹)$$

مرحله ۴- تعیین نقاط مرجع ایده‌آل مثبت (G) و منفی (B)

$$f_j^+ = \max\{f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}\}, \quad f_j^- = \min\{f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}\} \quad (۱۰)$$

$$G = \{f_1^+, f_2^+, \dots, f_n^+\} \quad (۱۱)$$

$$B = \{f_1^-, f_2^-, \dots, f_n^-\} \quad (۱۲)$$

مرحله ۵- محاسبه فاصله تا نقاط مرجع ایده‌آل مثبت و منفی

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left[f_{ij} - (f_{ij})_G\right]^2}, \qquad d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left[f_{ij} - (f_{ij})_B\right]^2} \quad (۱۳)$$

که $(f_{ij})_G$ و $(f_{ij})_B$ به ترتیب بیانگر مقادیر در نقاط مرجع ایده‌آل مثبت و منفی و d^+ و d^- نیز به ترتیب بیانگر فاصله تا نقاط مرجع ایده‌آل مثبت و منفی می‌باشند.

مرحله ۶- محاسبه ضریب TC هر نمونه و ارزیابی کیفیت آب

$$TC = \frac{d^-}{d^+ + d^-} \quad (۱۴)$$

پس از تعیین TC، رتبه کیفیت آب زیرزمینی بر اساس رتبه ضریب نزدیکی تعیین می‌شود. هر چه مقدار TC بزرگتر و به عدد یک نزدیکتر باشد، کیفیت آب بهتر است.

محاسبه وزن هر پارامتر با تئوری آنتروپی

وزن هر پارامتر، اهمیت نسبی هر پارامتر کیفی را در ارزیابی نهایی کیفیت آب نشان می‌دهد. از این رو، تعیین وزن پارامترهای کیفی آب گام مهمی در فرآیند ارزیابی است. روش‌های زیادی برای تعیین وزن هر پارامتر وجود دارد که یکی از آنها تئوری آنتروپی می‌باشد. این روش به طور گسترده در مطالعات مختلف استفاده شده است (Shi-fei and Zhong-zhi, 2005; Liu et al., 2007; Chen et al., 2008). نحوه وزن‌دهی پارامترها با تئوری آنتروپی به صورت مراحل زیر است (Li et al., 2012).

مرحله ۱- تشکیل ماتریس تصمیم اولیه: ماتریس مورد نظر همان ماتریس مقادیر هر پارامتر برای هر نمونه (ماتریس C) است که در مرحله اول روش TOSIS ساخته شد.

مرحله ۲- نرمال‌سازی ماتریس تصمیم اولیه برای حذف اثرات ناشی از واحدها و اعداد متفاوت برای هر پارامتر

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots\ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

$$y_{ij} = 0.8 \times \frac{c_{ij} - (c_{ij})_{min}}{(c_{ij})_{max} - (c_{ij})_{min}} + 0.1 \quad (۱۶)$$

مرحله ۳- محاسبه نسبت مقدار هر پارامتر j در هر نمونه i

$$P_{ij} = y_{ij} \Big/ \sum_{i=1}^{m} y_{ij} \quad (۱۷)$$

مرحله ۴- محاسبه آنتروپی اطلاعات

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^{m} P_{ij} \ln P_{ij} \quad (۱۸)$$

مرحله ۵- محاسبه وزن هر پارامتر

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^{n} (1 - e_j)} \quad (۱۹)$$

اولویت‌بندی ریسک آلودگی

ریسک خطر هر پدیده را می‌توان با دو عامل توالی وقوع و احتمال وقوع آن تخمین زد (Ruparathna et al., 2018). در این صورت ریسک آلودگی (CR) چاه‌های آب به توالی زمانی آلودگی (CC) و احتمال آلودگی (PC) آنها بستگی دارد. ریسک آلودگی آب‌ها

را می‌توان با معادله ۲۰ محاسبه کرد. هر چه مقدار CR بیشتر باشد، ریسک آلودگی نمونه بیشتر است و مخاطرات بیشتری برای سلامت انسان و دیگر جانداران ایجاد می‌کند.

$$CR = PC \times CC \quad (۲۰)$$

احتمال آلودگی چاه‌ها بر اساس رتبه‌بندی چاه‌ها با WQI و ضریب TC از روش ETOPSIS محاسبه می‌شود. فرمول‌های متعددی برای بررسی احتمال وقوع یک پدیده وجود دارد که از جمله کاربردی‌ترین آنها فرمول ویبول[1] می‌باشد (علیزاده، ۱۳۹۳). در این رابطه، احتمال وقوع آلودگی هر نمونه بر مبنای رتبه هر نمونه (چاه) (M) و تعداد کل چاه‌های مورد بررسی (N) تعیین می‌شود (معادله ۲۱). در این صورت هر چه عدد حاصل برای هر نمونه به یک نزدیکتر باشد، احتمال آلودگی آن نمونه بیشتر است.

$$PC = \frac{M}{N+1} \quad (۲۱)$$

برای تعیین توالی آلودگی هر چاه از روش زنجیره مارکوف[2] استفاده شد. زنجیره مارکوف روشی ریاضی برای مدل‌بندی فرآیندهای احتمالاتی است. مفهوم زنجیره مارکوف این است که یک زنجیره با یکسری از مشاهدات مورد بررسی قرار گرفته و احتمال تغییر هر کدام از مشاهدات از حالتی به حالت دیگر مشخص می‌شود. بنابراین احتمال وقوع یک حالت در زمان t به وضعیت آن در زمان t-1 بستگی دارد. در این مرحله لازم است تا حد آستانه‌ای برای رتبه آلودگی بر اساس ETOPSIS و WQI در نظر گرفته شود که معمولاً بین ۷۵ تا ۸۰ درصد برای علوم هیدرولوژی لحاظ می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۳). در این صورت میزان خطر آلودگی، به مقدار تخطی نسبت به این حد آستانه بستگی دارد. کمتر بودن رتبه ETOPSIS و WQI هر نقطه نمونه-برداری نسبت به مقدار آستانه بیانگر عدم آلودگی و بیشتر بودن آن نشان‌دهنده آلودگی است. در این مطالعه، وضعیت آلودگی هر نمونه در مدت ۷ سال متوالی بررسی و توالی آلودگی در این مدت زمان محاسبه گردید. برای بررسی وضعیت توالی آلودگی، با توجه به اثرات خطرناک آلودگی آب‌های شرب بر انسان و موجودات زنده از دو حد آستانه‌ای ۲۵ و ۵۰ درصد رتبه آلودگی WQI و ETOPSIS استفاده شد و وضعیت آلودگی بر اساس توالی به صورت جدول ۴ تعیین گردید.

پهنه‌بندی مکانی

سیستم اطلاعات جغرافیایی[3] (GIS) از ابزارهای مؤثر و مناسب بررسی توزیع مکانی اطلاعات و داده‌ها است که امکان تصمیم‌گیری سریع را فراهم می‌آورد. در این مطالعه، نقشه‌های توزیع مکانی شاخص WQI و ریسک آلودگی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شدند. در این تحقیق برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به داده‌های ناحیه‌ای، روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله[4] (IDW) با توان‌های یک، دو و سه برای هر یک از پارامترهای SO_4، Cl، HCO_3، pH، TDS، Na، Mg و Ca با نرم‌افزار GS^+ مقایسه و بهترین روش بر اساس مقادیر خطای RMSE و MAE انتخاب گردید. سپس برای رسم نقشه‌های پهنه‌بندی از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 استفاده گردید.

نتایج و بحث

پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی آب شرب

پیوستگی مکانی داده‌ها با استفاده از روش‌های مختلف میانیابی کریجینگ و IDW بررسی شد. رتبه‌بندی روش‌های میانیابی برای هر مؤلفه نشان داد که روش IDW با توان ۲ بهترین روش در تخمین و پهنه‌بندی مؤلفه‌ها می‌باشد (نتایج ارائه نشده است)(سیفی و ریاحی، ۱۳۹۶) که مقادیر RMSE و MAE آن کمتر از روش کریجنیگ بود. بنابراین برای ترسیم نقشه‌های کیفیت آب چاه‌های مورد بررسی از پهنه‌بندی IDW در محیط ArcGIS استفاده شد (شکل ۲). همانطور که ملاحظه می‌شود، نقشه پهنه‌بندی غلظت سولفات بیانگر افزایش غلظت این ترکیب شیمیایی از شرق به سمت غرب، جنوب غربی و جنوب آبخوان شهربابک است به طوری حداکثر غلظت در یکی از چاه‌های واقع در جنوب آبخوان اتفاق افتاده است. غلظت سولفات در قسمت‌های شمالی و شرقی آبخوان، کمتر از حد مجاز استاندارد ۱۰۵۳ به مقدار ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است که حدود ۳۶/۴ درصد از مساحت آبخوان را شامل می‌شود. همانطور که در جدول ۱ نیز آورده شده است، غلظت سولفات فقط در ۱۳ چاه (۳۶/۱ درصد از کل چاه‌ها) کمتر از حد مجاز شرب است. یکی از دلایل غلظت زیاد سولفات در نیمه جنوبی آبخوان مورد بررسی، استفاده از کودهای سولفاته به منظور کشاورزی و انتقال آنها به آب‌های زیرزمینی، وجود دریاچه نمک و کویر نمک سیرجان است. نقشه پهنه‌بندی غلظت کلسیم، همانند سولفات است و حدود ۴۷/۳ درصد از مساحت آبخوان دارای غلظت مجاز کلسیم برای شرب می‌باشد.

غلظت کلر در قسمت شمال شرقی آبخوان، درحد مجاز شرب (۴/۵ درصد مساحت) می‌باشد و از شمال شرقی به سمت جنوب غربی، غلظت افزایش یافته است. غلظت زیاد کلر در اثر وجود اثرات حاشیه‌ای کویر نمک، انحلال نمک‌ها و همچنین ممکن است در اثر انتقال و انتشار بیش از حد فاضلاب در اطراف چاه‌های مورد بررسی ایجاد شده باشد. به جزء در قسمت‌های غرب و جنوب غربی آبخوان (۲۱/۱ درصد از مساحت)، غلظت منیزیم در اکثر نقاط در حد مجاز شرب قرار دارد. غلظت‌های بی‌کربنات و سدیم در اکثر نقاط بیش از

1-Weibull
2-Markov chain
3-Geographic information system
4-Inverse distance weighting

مقدار مجاز است و فقط در وسعت کوچکی از آبخوان به ترتیب در قسمت‌های غربی (۰/۹ درصد مساحت) و شرقی (۰/۵ درصد مساحت) مناسب برای استفاده شرب می‌باشد. انحلال مواد معدنی، مبادله کاتیونی در خاک‌های رسی منطقه و استفاده از شوینده‌ها می‌توانند منبع افزایش سدیم در منطقه مورد بررسی باشد.

جدول ٤- طبقه‌بندی آلودگی آب زیرزمینی بر اساس توالی زمانی یا شدت آلودگی (سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۹۵)

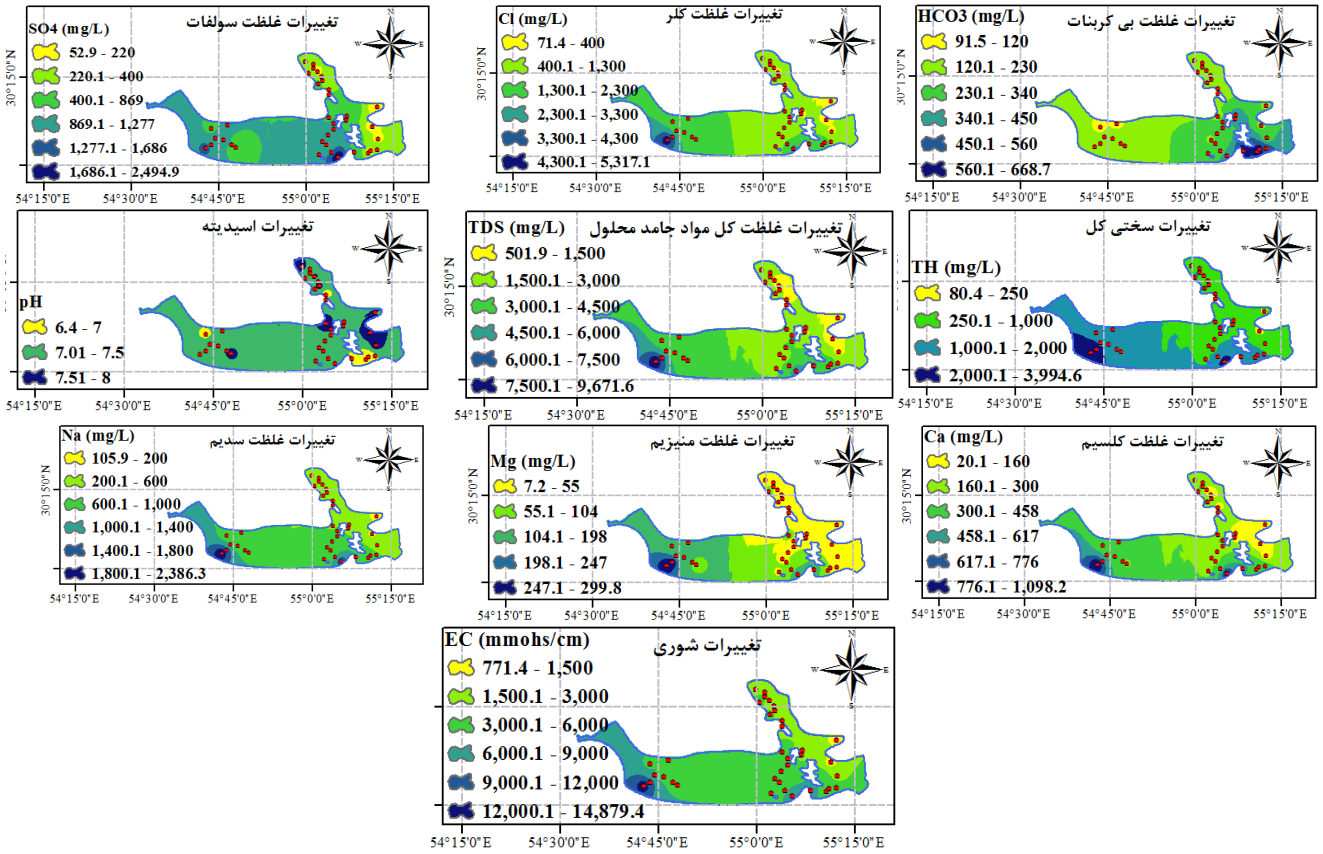
توالی	۰	۱	۲	۳	۴	۴ <
تفسیر	بدون آلودگی	کم	میانه	زیاد	خیلی زیاد	کاملاً خطرناک

فقط در ۰/۵ درصد از مساحت آبخوان، مقدار EC کمتر از ۱۵۰۰ میلی‌موس بر سانتی‌متر و قابل استفاده شرب است و غلظت EC از شرق به غرب آبخوان افزایش یافته است به طوری که در قسمت غربی آبخوان، به بیشترین مقدار خود برابر با ۱۴۸۲۶/۱ میلی‌موس بر سانتی‌متر رسیده است. نقشه پهنه‌بندی شوری چاه‌های آبخوان شهربابک نشان می‌دهد که به علت شوری بالای آب و در صورت مجاز بودن غلظت سایر عناصر، برای استفاده از این آب‌ها به منظور شرب، نیاز به شیرین‌سازی آنها و استفاده از دستگاه‌های اسمز معکوس می‌باشد.

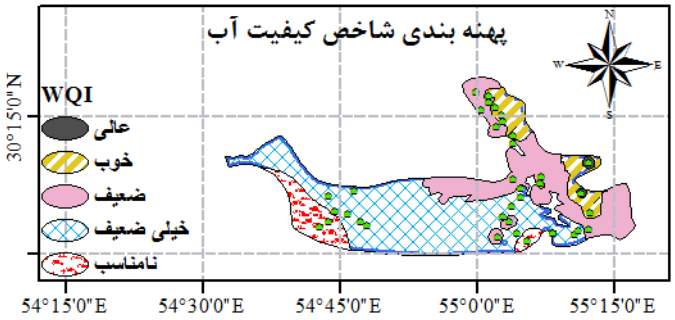
در آب‌های طبیعی، TDS اساساً شامل نمک‌های غیرآلی و مقادیر کمی مواد آلی و گازهای محلول است (Alam et al., 2012). پارامتر TDS از موارد مهم تعیین پایداری منابع آب زیرزمینی برای اهداف مختلف همچون شرب است (Li et al., 2014). نقشه پهنه‌بندی TDS نیز حاکی از وجود مقادیر زیاد مواد جامد محلول در آب‌های قسمت‌های جنوبی، مرکزی و غربی آبخوان است که استفاده از این آب‌ها برای اهداف شرب را با مشکل مواجه ساخته است. در حدود ۱۰/۱ درصد از مساحت آبخوان در قسمت‌های شرقی و شمالی، دارای TDS در حد مجاز شرب است. مقدار متوسط این پارامتر در چاه‌های مورد بررسی ۲۸۲۴ میلی‌گرم بر لیتر است و از مجموع ۳۶ چاه، فقط نه چاه دارای غلظت‌های TDS کمتر از حد مجاز استاندارد ۱۰۵۳ می‌باشند. مقدار اسیدیته آب نیز در اکثر نقاط آبخوان در حد نرمال ۸-۷ است که مشکلی از لحاظ اسیدی یا قلیایی بودن آب را ایجاد نکرده است و فقط در ۱/۷ درصد از آب‌های آبخوان در قسمت جنوبی، اسیدیته کمتر از ۷ و آب اسیدی است. نقشه پهنه‌بندی سختی کل نیز بیانگر، سختی زیاد آب در تمامی قسمت‌های آبخوان شهربابک می‌باشد به طوری که برای استفاده شرب این آب‌ها بایستی اصلاحات لازم صورت گیرد. بنابراین بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی به نظر می‌رسد که امکان استفاده شرب از آب‌های آبخوان شهربابک فقط در قسمت‌های شمالی، شرقی و شمال شرقی وجود دارد اما در همین قسمت‌ها نیز غلظت برخی پارامترهای شیمیایی بیشتر از حد مجاز استاندارد شرب است که بایستی اصلاح گردند. نتایج تحقیق جهانشاهی و همکاران (۱۳۹۳) در پهنه‌بندی کیفیت آب شرب آبخوان شهربابک نیز نشان داده است که در محدوده‌های جنوب شرقی و جنوبی منطقه، شرایط نامطلوبی به لحاظ آب شرب وجود دارد و مقادیر غلظت پارامترهای TDS، Cl و EC در این مناطق بیش از حد مجاز شرب می‌باشد. در این تحقیق، علل افت شدید کیفیت آب در مناطق جنوبی و جنوب شرقی آبخوان، وجود کفه نمک و بهره‌برداری بیش از حد مجاز منابع به دلیل تجمع روستاها و زمین‌های کشاورزی عنوان شده است. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۹۰) نیز در تحقیق خود علت کاهش کیفیت آب در دشت ساوه را مجاور بودن با لایه‌های نمکی سازند قم بیان کردند.

پهنه‌بندی شاخص WQI

در شکل ۳ نقشه پهنه‌بندی WQI برای اهداف شرب نشان می‌دهد که فقط سه چاه در قسمت شرقی آبخوان دارای وضعیت عالی از نظر کیفیت آب شرب می‌باشند. وضعیت WQI در چاه‌های قسمت شرقی آبخوان، در حد کیفی خوب است و بنابرین در مجموع فقط در ۱۵/۱ درصد از مساحت آب‌های زیرزمینی آبخوان شهربابک، وضعیت کیفی آب به لحاظ WQI در حالت عالی و خوب قرار گرفته است. اما در همین پهنه کیفی خوب نیز بایستی اصلاحاتی از نظر سدیم، کلر، شوری، بی‌کربنات، مواد جامد محلول و سختی کل روی آب‌ها انجام شود تا استفاده از این آب‌ها، عوارض سلامتی ایجاد نکند. مقادیر WQI چاه‌های مورد بررسی در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر WQI در محدوده ۳۶/۸ تا ۶۴۱/۹ و در طبقات عالی تا نامناسب برای شرب متغیر هستند. از مجموع ۳۶ چاه مورد مطالعه، سه چاه شماره ۳، ۱۶ و ۴ (جنوب شرقی آبخوان خاتون آباد) دارای مقادیر WQI کمتر از ۵۰ بودند و بنابراین در دسته‌بندی عالی قرار گرفتند. مقادیر WQI برای شش چاه در دسته‌بندی خوب و در دامنه ۹۹/۹۹-۵۰ قرار داشت. همچنین، بیشترین تعداد چاه‌ها (۲۷ چاه)، دارای WQI بیشتر از ۱۰۰ بودند و تعداد چاه‌های قرار گرفته در دسته ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۳ و ۴ می‌باشد. از مجموع ۸۴/۹ درصد مساحت باقیمانده آبخوان، ۳۱/۴ درصد در وضعیت کیفی ضعیف (قسمت‌های شمالی، مرکزی و جنوب شرقی)، ۳۶/۱ درصد در وضعیت کیفی خیلی ضعیف (در قسمت‌های مرکزی، غربی و جنوبی) و در نهایت ۱۷/۴ درصد در وضعیت کیفی نامناسب (در قسمت غربی آبخوان) برای استفاده شرب از نظر WQI قرار دارند.



شکل ۲- پهنه‌بندی تغییرات غلظت مؤلفه‌های کیفی آب آبخوان شهربابک از منظر شرب



شکل ۳- پهنه‌بندی تغییرات WQI برای اهداف شرب

رتبه‌بندی چاه‌های مورد مطالعه در آبخوان شهربابک بر اساس شاخص WQI در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول، رتبه هر چاه بر اساس مقدار WQI آن چاه تعیین شده است. به عنوان مثال، چاه شماره ۳ با کمترین مقدار WQI (برابر با ۳۶/۸) در طبقه کیفی عالی قرار گرفته و رتبه اول را کسب کرده است. در حالی که، چاه شماره ۱ دارای بیشترین مقدار WQI (برابر با ۶۴۱/۹) می‌باشد که در طبقه کیفی نامناسب و رتبه ۳۶ قرار گرفته است. مقادیر پارامترهای SO_4، Cl، HCO_3، TDS، Na، Mg و Ca چاه شماره ۱ در سال مورد بررسی به ترتیب برابر با ۱۵۰۷/۲، ۵۳۲۵، ۱۵۲/۵، ۹۶۸۵، ۲۳۸۹/۷، ۳۰۰ و ۱۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. این مقادیر به ترتیب در حدود ۳/۸، ۱۳/۳، ۱/۳، ۶/۵، ۱۱/۹، ۲ و ۳/۷ برابر حد مجاز استاندارد ۱۰۵۳ شرب برای هر پارامتر می‌باشند. این در حالی است که در چاه شماره ۳ فقط مقدار پارامتر HCO_3 در حدود ۵۲/۲ درصد (با مقدار ۱۸۳ میلی‌گرم بر لیتر) بیش از حد استاندارد ۱۰۵۳ شرب بوده است و بقیه پارامترهای SO_4، Cl، TDS، Na، Mg و Ca به ترتیب برابر با ۹۱/۲، ۷۱، ۵۰۱، ۱۲۱/۹، ۷/۲ و ۲۰ اندازه‌گیری شده‌اند. با

توجه به جدول ۲، بیشترین ضرایب وزنی شاخص WQI به پارامترهای سولفات، کلر و مواد جامد محلول اختصاص داده شده است و در این بین پارامتر بی‌کربنات کمترین وزن برابر با ۰/۰۳۴ را دارا می‌باشد. بنابراین ملاحظه می‌شود، اگرچه چاه شماره ۳ دارای غلظت بی‌کربنات بیش از حد مجاز شرب است اما چون وزن کمتری را به خود اختصاص داده است، اثر آن در مقدار نهایی WQI تأثیر چندانی نداشته است. برعکس در چاه شماره ۱، پارامترهای دارای بیشترین وزن در WQI، چندین برابر حد مجاز اندازه‌گیری شده‌اند.

جدول ۵- مقادیر وزنی حاصل از تئوری آنتروپی برای هر پارامتر شیمیایی مورد استفاده

پارامتر	SO_4	Cl	HCO_3	pH	TDS	Na	Mg	Ca
ω_j	۰/۱۲۹	۰/۱۲۹	۰/۱۷۰	۰/۰۵۲	۰/۱۰۹	۰/۱۲۷	۰/۱۷۰	۰/۱۱۵

جدول ٦- رتبه‌بندی کیفی چاه‌های مورد بررسی بر اساس WQI و ETOPSIS و مقدار ریسک آلودگی آنها

شماره چاه	WQI				ETOPSIS			
	مقدار	رتبه	توالی ٪۵۰	توالی ٪۲۵	مقدار	رتبه	توالی ٪۵۰	توالی ٪۲۵
۱	۶۴۱/۹	۳۶	۷	۷	۰/۲۸	۳۶	۷	۷
۲	۲۱۹/۴	۲۶	۷	۷	۰/۷۰	۲۷	۶	۷
۳	۳۶/۸	۱	۰	۰	۰/۹۵	۲	۰	۰
۴	۴۹/۷	۳	۰	۰	۰/۹۲	۵	۰	۰
۵	۱۵۶/۵	۱۶	۰	۷	۰/۷۸	۱۷	۱	۷
۶	۱۱۴/۶	۱۰	۰	۷	۰/۸۹	۹	۰	۴
۷	۸۳/۲	۷	۰	۲	۰/۹۲	۷	۰	۰
۸	۱۳۹/۳	۱۴	۰	۵	۰/۷۹	۱۵	۱	۵
۹	۵۶/۶	۵	۰	۰	۰/۹۴	۴	۰	۰
۱۰	۱۷۷/۶	۱۸	۰	۷	۰/۷۹	۱۶	۴	۷
۱۱	۵۴/۴	۴	۰	۰	۰/۹۵	۱	۰	۰
۱۲	۸۸/۱	۹	۰	۰	۰/۸۹	۸	۰	۰
۱۳	۱۲۷/۶	۱۳	۰	۷	۰/۸۴	۱۰	۰	۷
۱۴	۶۲/۳	۶	۰	۰	۰/۹۴	۳	۰	۰
۱۵	۴۳۸/۸	۳۴	۷	۷	۰/۴۰	۳۴	۷	۷
۱۶	۴۱/۹	۲	۰	۰	۰/۹۲	۶	۰	۰
۱۷	۲۵۹/۸	۳۲	۷	۷	۰/۶۷	۲۹	۷	۷
۱۸	۲۲۵/۷	۲۸	۷	۷	۰/۷۱	۲۵	۷	۷

شماره چاه	WQI				ETOPSIS			
	مقدار	رتبه	توالی ٪۵۰	توالی ٪۲۵	مقدار	رتبه	توالی ٪۵۰	توالی ٪۲۵
۱۹	۲۳۱/۱	۲۹	۷	۷	۰/۶۹	۲۸	۷	۷
۲۰	۲۱۱/۴	۲۴	۷	۷	۰/۶۷	۳۰	۷	۷
۲۱	۲۴۹/۱	۳۰	۷	۷	۰/۶۱	۳۲	۷	۷
۲۲	۱۸۲/۵	۱۹	۲	۷	۰/۷۷	۱۸	۱	۷
۲۳	۱۵۳/۱	۱۵	۰	۷	۰/۸۰	۱۴	۰	۷
۲۴	۲۱۶/۱	۲۵	۷	۷	۰/۷۶	۱۹	۷	۷
۲۵	۳۰۵/۶	۳۳	۷	۷	۰/۵۰	۳۳	۷	۷
۲۶	۴۹۰/۲	۳۵	۷	۷	۰/۳۳	۳۵	۷	۷
۲۷	۲۲۲/۸	۲۷	۷	۷	۰/۷۲	۲۳	۷	۷
۲۸	۱۲۵/۲	۱۲	۰	۷	۰/۸۳	۱۱	۰	۷
۲۹	۲۰۹/۱	۲۲	۷	۷	۰/۷۶	۲۰	۴	۷
۳۰	۱۶۹/۵	۱۷	۵	۷	۰/۷۳	۲۲	۷	۷
۳۱	۲۵۷/۲	۳۱	۷	۷	۰/۶۲	۳۱	۷	۷
۳۲	۱۱۵/۵	۱۱	۰	۷	۰/۸۰	۱۳	۰	۷
۳۳	۲۰۴/۳	۲۰	۷	۷	۰/۷۳	۲۱	۶	۷
۳۴	۲۰۷/۹	۲۱	۷	۷	۰/۷۲	۲۴	۵	۷
۳۵	۲۱۰/۴	۲۳	۷	۷	۰/۷۱	۲۶	۷	۷
۳۶	۸۴/۶	۸	۰	۰	۰/۸۲	۱۲	۰	۵

رتبه‌بندی کیفیت آب چاه‌ها بر اساس روش ترکیبی TOPSIS با آنتروپی (ETOPSIS)

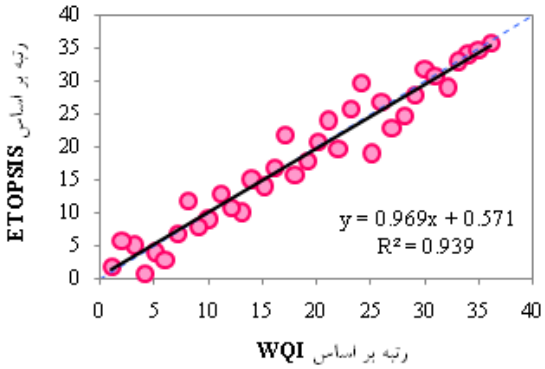
همانطور که بیان شد یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر تدوین روش ترکیبی آنتروپی و TOPSIS برای ارزیابی کیفی و رتبه‌بندی چاه‌های آب است. استفاده از روش WQI به دلیل لحاظ وزن‌های متفاوت و تجربی برای هر پارامتر شیمیایی سبب کاهش تأثیر پارامترهایی با مقادیر بیشتر از مقدار استاندارد بر کیفیت آب آشامیدنی و خطا در رتبه‌بندی کیفی چاه‌ها خواهد شد. بنابراین در تحقیق حاضر از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS در ترکیب با آنتروپی برای محاسبه و مقایسه رتبه‌های کیفی چاه‌ها نسبت به روش WQI استفاده شد. روش ETOPSIS به دلیل نرمال‌سازی داده‌های مورد بررسی، می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه کند. با نرمال‌سازی هر پارامتر کیفی، تأثیر هر پارامتر در رتبه‌بندی چاه‌ها مشاهده می‌شود (Yousefi et al., 2018). از روش نرمال‌سازی داده‌ها در مطالعات متعددی به منظور بهبود رتبه‌بندی WQI آب برای اهداف شرب استفاده شده است (Zahedi, 2017; Zahedi et al., 2017; Li et al., 2014; Amiri et al., 2014). همچنین در روش WQI، وزن‌های هر پارامتر به صورت تجربی و مطابق با نظر کارشناسی برای هر پارامتر کیفی لحاظ می‌شود اما در روش ترکیبی ETOPSIS از روش وزن‌دهی تئوری آنتروپی برای تعیین اساسی وزن‌های پارامترها استفاده شد که وزن‌های حاصل از نرمال‌سازی داده‌ها را ارائه می‌کند.

نتایج مقادیر وزنی هر پارامتر کیفی بر اساس محاسبات تئوری آنتروپی در جدول ۵ و رتبه‌بندی کیفی چاه‌ها با روش ETOPSIS در جدول ۶ ارائه شده است. پارامترهای با حداکثر وزن‌های آنتروپی بیشترین تأثیر را بر رتبه‌بندی کیفی آب دارند (Jianhua et al. 2011). بنابراین به نظر می‌رسد که دو پارامتر غلظت منیزیم و بی‌کربنات با وزن ۰/۱۷ بیشترین تأثیر و پارامتر اسیدیته با وزن ۰/۰۵ کمترین اثر را بر رتبه‌بندی ETOPSIS داشته باشند. همچنین بر اساس تئوری آنتروپی، اثر پارامترهای Cl، SO_4 و Na بیشتر از پارامترهای Mg و TDS بر کیفیت آب و ارزیابی وضعیت شرب آن می‌باشد.

همانطور که از جدول ۶ مشخص است، بعد از کاربرد روش

ETOPSIS، رتبه‌بندی کیفی چاه‌ها نسبت به روش WQI تغییر کرده است و چنین تغییری بویژه در رتبه چاه‌هایی با مقادیر WQI نزدیک به هم یا در مرزهای WQI قابل مشاهده است. به عنوان مثال، چاه شماره ۴ با مقدار WQI برابر با ۴۹/۷ در دسته کیفی عالی و در رتبه ۳ قرار گرفته است در حالی که چاه‌های شماره ۱۱ و ۹ با مقادیر WQI نزدیک به چاه شماره ۴ و با مقادیر به ترتیب برابر با ۵۴/۴ و ۵۶/۶ در دسته کیفی خوب و در رتبه‌های ۴ و ۵ قرار گرفته‌اند. بر اساس رتبه-بندی ETOPSIS، چاه‌های شماره ۴، ۱۱ و ۹ به ترتیب در رتبه‌های ۵، ۱ و ۴ قرار گرفتند. بنابراین ملاحظه می‌شود که علیرغم طبقه خوب چاه شماره ۱۱، این چاه دارای بهترین کیفیت به لحاظ تصمیم‌گیری چندمعیاره ETOPSIS می‌باشد. همچنین بر اساس رتبه‌بندی WQI، چاه شماره ۳ به عنوان بهترین چاه از لحاظ کیفیت آب معرفی شده است در حالی که بر اساس روش ETOPSIS رتبه اول بهترین وضعیت کیفی آب به چاه شماره ۱۱ اختصاص داده شده است. بررسی مقادیر کیفی این دو چاه نشان داد که غلظت تمامی پارامترها بجز بی‌کربنات، کمتر از حد مجاز استاندارد برای شرب است. مقدار HCO_3 در دو چاه به ترتیب برابر با ۱۸۳ و ۱۵۲ میلی‌گرم بر لیتر است که به ترتیب به مقدار ۵۲ و ۲۷ درصد بیشتر از مقدار استاندارد ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشند.

لازم به یادآوری است که روش ETOPSIS، رتبه چاه‌ها را بر اساس تأثیر هر پارامتر در آلودگی آب‌ها محاسبه می‌کند. بر اساس نتایج، بیشترین تغییرات در وضعیت رتبه‌بندی چاه‌های با کیفیت عالی و خیلی ضعیف از نظر WQI رخ داده است. این تغییر رتبه کیفی چاه‌ها، بیانگر اثرات نرمال‌سازی مقادیر هر پارامر کیفی در کل نمونه‌ها است. بنابراین بکارگیری روش‌های MCDM مانند ETOPSIS می‌تواند رتبه دقیق‌تری برای نمونه‌هایی با مقادیر WQI نزدیک به هم را محاسبه کند (Yousefi et al., 2018). در شکل ۴ نمودار همبستگی پیرسون بین رتبه‌های حاصل از WQI و ETOPSIS ارائه شده است. شکل نشان می‌دهد که رتبه‌های دو روش به طور معناداری در سطح ۹۹ درصد با مقدار R^2 برابر با ۰/۹۴ همبسته هستند. بنابراین در منطقه مورد مطالعه، روش WQI نیز می‌تواند رتبه‌های کیفی دقیقی را ارائه دهد. اما بر اساس نتایج تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی و مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی آبخوان شهربابک بهتر است از روش‌های MCDM همچون ETOPSIS استفاده گردد تا هزینه‌های حاصل از اصلاح آب‌های آبخوان شهربابک و مدیریت آنها به منظور شرب کاهش یابد.



شکل ٤- نمودار همبستگی رتبه‌های حاصل از WQI و ETOPSIS چاه‌های آبخوان شهربابک

تحلیل ریسک آلودگی چاه‌ها

همانطور که در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شد، به منظور ارزیابی و محاسبه ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی آبخوان شهربابک از دو عامل احتمال آلودگی و توالی آلودگی استفاده شده است. در جدول ۶، مقادیر توالی آلودگی در دوره زمانی متوالی ۷ ساله برای مقادیر آستانه خطر ۲۵٪ و ۵۰٪ آلودگی بر اساس رتبه WQI و ETOPSIS آورده شده است. واضح است که آستانه آلودگی ۲۵٪، توالی خطر بیشتری را ایجاد کرده است. در هر دو روش، از مجموع ۳۶ چاه مورد مطالعه، به ترتیب ۱۸ و ۲۸ چاه دارای توالی آلودگی بیش از چهار سال، بر اساس آستانه خطر ۵۰ و ۲۵ درصد بودند. بنابراین بر اساس جدول ۴، به لحاظ توالی آلودگی چاه‌ها، به ترتیب ۵۰ و ۷۵ درصد چاه‌ها در وضعیت کاملاً خطرناک آستانه‌های خطر ۵۰ و ۲۵ درصد قرار دارند. بخش عمده‌ای از اراضی کشاورزی و باغات واقع در دشت شهربابک، در مناطق خطرناک و کاملاً خطرناک آلودگی از نظر توالی آلودگی هستند. یعنی با گذشت زمان، وضعیت آلودگی چاه‌های واقع در آبخوان شهربابک نه تنها بهبود پیدا نکرده است بلکه به دلیل استفاده بی‌رویه از آب‌ها، استفاده زیاد از سموم و کودهای شیمیایی و عدم مدیریت مناسب روز به روز در حال آلودگی بیشتر و نابودی هستند. بنابراین بایستی برای جلوگیری از ورود بیشتر آلودگی به منابع آب‌های زیرزمینی دشت شهربابک در آینده، مراقبت‌ها و کنترل‌های شدیدی چه از طرف کشاورزان و چه مدیران صورت گیرد و از برداشت بیش از حد آب‌ها و توسعه بیش از اندازه

واحدهای صنعتی آلاینده و زمین‌های کشاورزی جلوگیری به عمل آید. همچنین به دلیل واقع شدن کارخانه ذوب مس خاتون‌آباد و کارخانه مولیبدن در این مناطق، بایستی به طور خاص به مسائل زیست محیطی توجه شود.

در شکل ۵ پهنه‌بندی ریسک آلودگی آب چاه‌ها بر اساس دو روش WQI و ETOPSIS آورده شده است. هر چهار نقشه تقریباً روند یکسانی از ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی آبخوان شهربابک را نشان می‌دهند به طوری که ریسک آلودگی در قسمت‌های شرقی کم است که با حرکت به سمت غرب و جنوب غربی، ریسک آلودگی زیاد و خطرناک می‌شود. در نقشه ریسک بر اساس آستانه ۵۰ درصد رتبه WQI و ETOPSIS، به ترتیب ۳۷/۶ و ۳۶/۹ درصد از مساحت مورد بررسی، شامل ۲۰ درصد ریسک آلودگی است که این وضعیت در مورد نقشه‌های ریسک بر اساس آستانه ۲۵ درصد به ترتیب به ۱۹ و ۲۴/۳ درصد مساحت تنزل می‌کند. از اعداد ارائه شده در جدول ۶ و همچنین از نقشه‌های ارائه شده در شکل ۵، می‌توان به عنوان راهنمایی به منظور برنامه‌ریزی در مورد آب‌های آبخوان شهربابک استفاده کرد. در شکل ۶ رتبه‌های ریسک آلودگی چاه‌ها آورده شده است. ملاحظه می‌شود که رتبه‌بندی ریسک آلودگی دو روش به یکدیگر نزدیک می‌باشد و با ضرایب تعیین ۰/۹۵ و ۰/۹۴ به یکدیگر همبسته می‌باشند (شکل ۷). چاه شماره ۱ که رتبه آلودگی ۳۶ برای اهداف شرب را کسب کرده بود دارای رتبه اول ریسک آلودگی است و چاه شماره ۱۱ کمترین ریسک آلودگی را دارا می‌باشد.

بنابراین ملاحظه می‌شود که اکثر آب‌های زیرزمینی آبخوان شهربابک دارای ریسک آلودگی بالا به لحاظ شرب می‌باشد و لازم است تا تمهیدات و مدیریت ریسک اساسی جهت کاهش آلودگی آنها اتخاذ شود تا مخاطرات سلامتی انسان‌ها و دیگر جانداران به حداقل ممکن برسد. برای مدیریت ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی بایستی خط‌مشی‌های واضح و شفافی مطابق با شرایط آبخوان مورد بررسی تهیه شود. بدین منظور بایستی برنامه‌هایی همچون رعایت قوانین و مقررات ملی و بین‌المللی مدیریت آب چاه‌ها، بهبود فرآیندها و روش‌های اجرایی کاهش مستمر آلاینده‌ها، بهبود آموزش و فرهنگ مشارکت و مسئولیت‌پذیری در کاهش ریسک آلودگی آب چاه‌ها علی‌الخصوص برای کشاورزان منطقه (به دلیل گستردگی کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی و آلی) و الزام پیمان‌کاران به رعایت قوانین ملی مرتبط با منابع آب به صورت سخت‌گیرانه لحاظ شود. همچنین در این مورد، گسترش مرزهای سیاسی و اداری تأثیرگذار بر ارائه گزارش‌ها، آمار و اطلاعات نیز حائز اهمیت است (سازمان برنامه و بودجه کشور، ۱۳۹۵). به استناد بند ج ماده ۱۰۴ قانون برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی و آیین‌نامه اجرایی آن، واحدهای تولیدی موظفند برای کاهش عوامل آلوده‌کننده منابع آب و تطبیق مشخصات فنی خود با ضوابط زیست محیطی اقدام کنند. از واحدهایی که از انجام این مهم خودداری می‌کنند و فعالیت‌های آنها موجب تخریب و آلودگی منابع آب می‌شود، جریمه دریافت و برای اجرای طرح‌های سالم‌سازی هزینه شود.

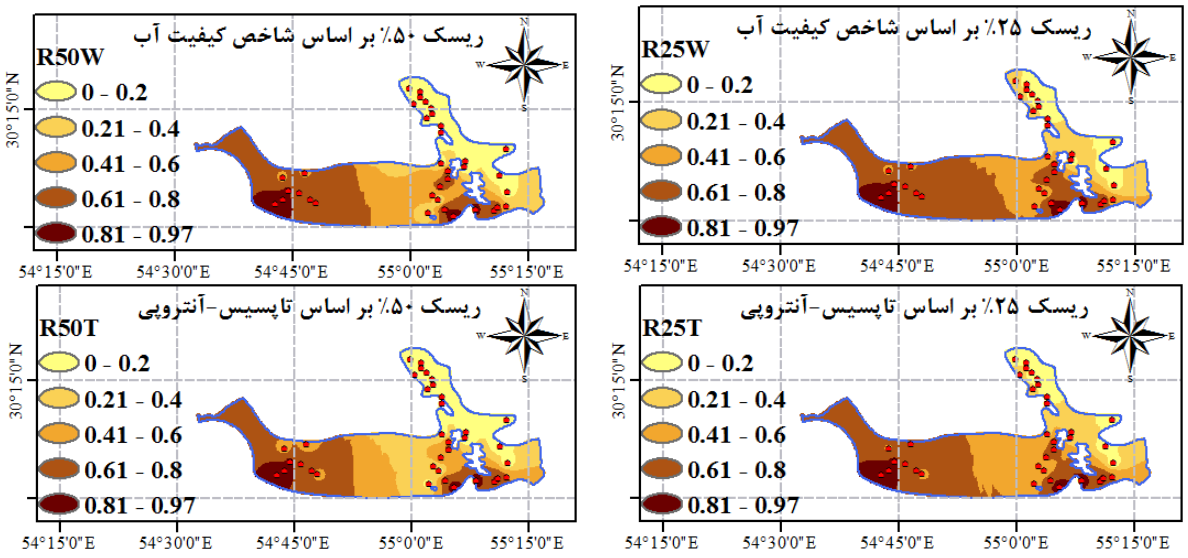
نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آب زیرزمینی، مهم‌ترین منبع تأمین شرب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود که کیفیت آنها روزبه روز در حال کاهش است. کاهش کیفیت آب شرب، مخاطرات و ریسک سلامتی جدی را برای انسان و جانداران ایجاد می‌کند. تحقیق حاضر با هدف بررسی وضعیت کیفیت آب در ۳۶ چاه واقع در آبخوان شهربابک و رتبه‌بندی کیفی و ریسک آنها انجام شده است. در مرحله اول با ترسیم نقشه پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب در آبخوان مورد نظر با روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)، کیفیت آب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که به طور کلی، آب‌های مورد بررسی در وضعیت کیفی مناسبی قرار ندارند و فقط تعدادی اندکی چاه در سمت شرقی آبخوان شهربابک دارای مقادیر اسیدیته، کلر، سولفات، کلسیم، سدیم، کل مواد جامد محلول و شوری کمتر از حد مجاز شرب بر طبق استاندارد ۱۰۵۳ هستند. آب‌های جنوبی و غربی آبخوان شهربابک به دلیل مجاورت با دریاچه نمک و کویر نمک سیرجان، استفاده از کودهای شیمیایی همچون کودهای سولفاته در مناطق پسته‌کاری بویژه در خاتون‌آباد و رباط و انتقال و انتشار آنها به آب‌های زیرزمینی به دلیل عدم زهکشی مناسب، وجود کارخانه ذوب مس خاتون‌آباد و عدم کنترل زهاب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های صنعتی و خانگی وضعیت نامناسبی به لحاظ شرب دارند.

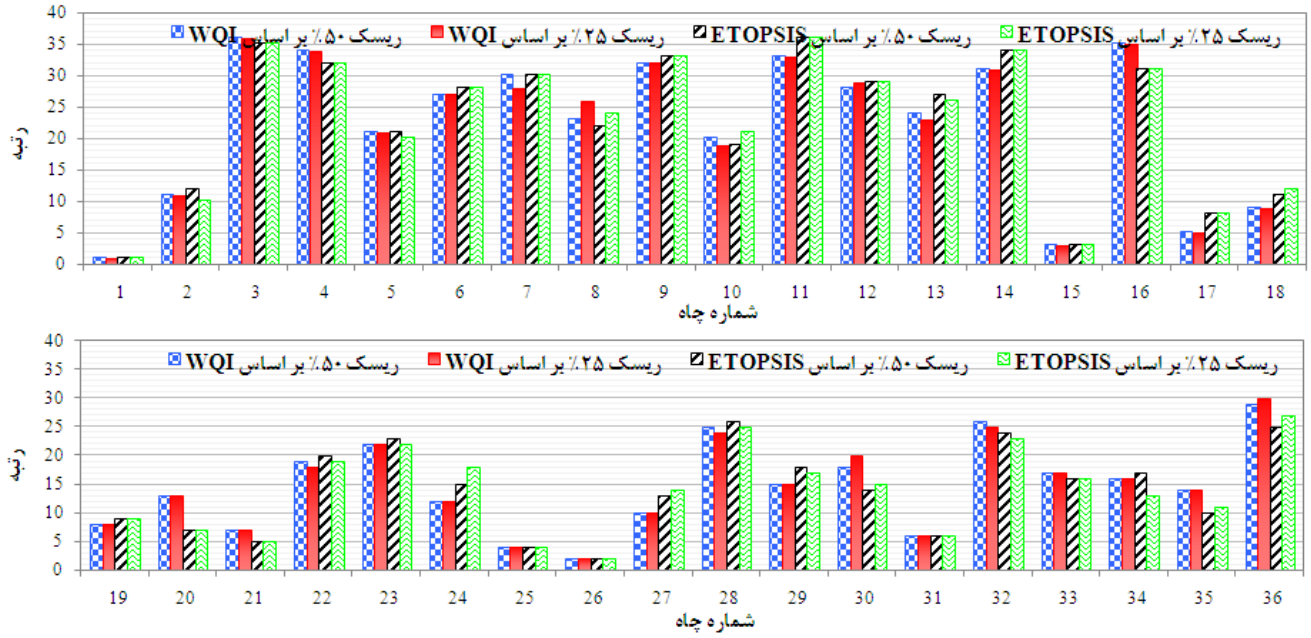
در مرحله دوم، از شاخص کیفیت آب (WQI) استفاده و با استفاده از وزن‌های تجربی اختصاص داده شده به هر پارامتر شیمیایی، وضعیت آبخوان از نظر استفاده شرب بررسی و در پنج طبقه عالی، خوب، ضعیف، خیلی ضعیف و نامناسب دسته‌بندی شدند. نتایج نشان دادند که ۳ چاه در طبقه عالی و ۶ چاه در طبقه خوب قرار دارند و ۲۷ چاه نیز در طبقات ضعیف تا نامناسب قرار دارند. نقشه پهنه‌بندی WQI نیز حاکی از وجود پهنه‌های خوب آب در سمت شرقی آبخوان شهربابک بود که با نتایج تحلیل پارامترهای شیمیایی همخوانی داشت. ارزیابی کیفیت آب با روش WQI به دلیل استفاده از وزن‌های تجربی و تأثیر زیاد پارامترهای با وزن کم و غلظت زیاد (و برعکس) بر نتیجه نهایی، نمی‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد. بنابراین در مرحله سوم تحقیق حاضر، از روش ترکیبی تئوری آنتروپی با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS (ETOPSIS) به عنوان روشی نوین در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده و چاه‌های مورد بررسی رتبه‌بندی شدند.

وزن هر پارامتر شیمیایی با روش آنتروپی تعیین و در روش

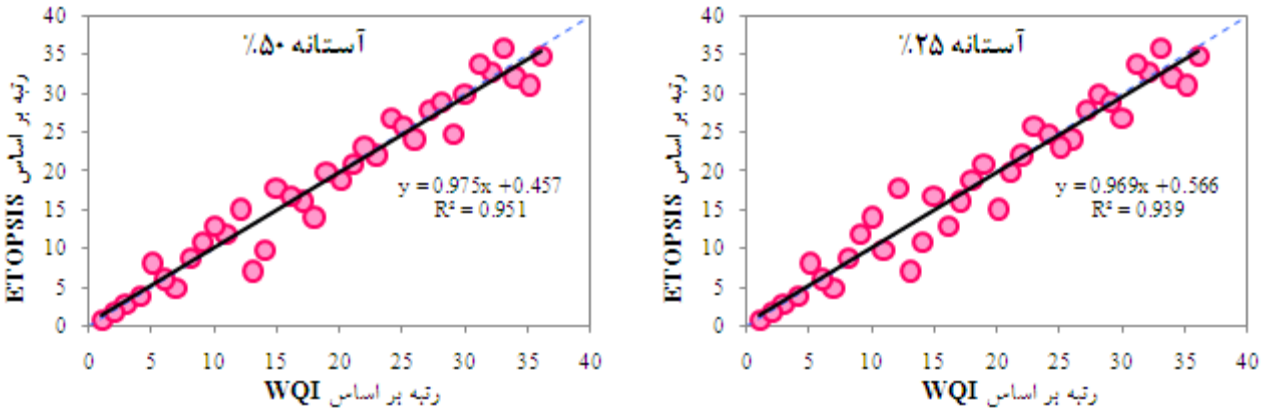
TOPSIS استفاده و رتبه‌بندی بر اساس داده‌های نرمال شده انجام شد. نرمال‌سازی داده‌های سبب می‌شود تا تأثیر همه پارامترها در مقادیر نهایی دیده شود. پس از کاربرد روش ETOPSIS، رتبه‌بندی کیفی چاه‌ها نسبت به روش WQI تا حدودی تغییر کرد و چنین تغییری بویژه در رتبه چاه‌هایی با مقادیر WQI نزدیک به هم یا در مرزهای WQI قابل مشاهده بود. بررسی رتبه‌های حاصل از دو روش WQI و ETOPSIS و تحلیل بر اساس مقادیر پارامترهای شیمیایی نشان داد که روش ETOPSIS قادر به ارائه نتایج مفیدتر و دقیق‌تری می‌باشد. بنابراین استفاده از روش ارائه شده در تحقیق حاضر می‌تواند در مدیریت بهتر کیفیت آب‌ها، بهبود وضعیت سفره های آب زیرزمینی و کاهش آثار محیط زیستی آن در منطقه بسیار کمک‌کننده باشد. در مرحله چهارم، با بررسی توالی‌های هفت ساله آلودگی آب چاه‌های مورد مطالعه، ریسک آلودگی آب‌ها محاسبه شد. نقشه پهنه‌بندی ریسک آلودگی حاکی از وجود ریسک ۲۰ درصدی آلودگی حتی در مناطق شرقی آبخوان شهربابک بود که لازم است تمهیدات مدیریت ریسک کارآمدی برای جلوگیری از نابودی این آب‌های باقیمانده در سطوح بالادستی اتخاذ شود. رتبه‌های ریسک حاصل از دو روش WQI و ETOPSIS همبستگی قوی با یکدیگر داشتند.



شکل ۵- نقشه ریسک آلودگی چاه‌ها بر اساس WQI و ETOPSIS



شکل ٦- نمودار رتبه ریسک آلودگی چاه‌ها بر اساس WQI و ETOPSIS



شکل ۷- نمودار همبستگی رتبه‌های ریسک حاصل از WQI و ETOPSIS برای چاه‌ها

منابع

جهانشاهی، ا.، روحی مقدم، ع. و دهواری، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین‌آمار (مطالعه موردی: آبخوان دشت شهربابک). دانش آب و خاک. ۲،۲۴: ۱۹۷-۱۸۳.

سازمان برنامه و بودجه کشور. ۱۳۹۵. راهنمای مدیریت ریسک سوانح آلودگی در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی. ضابطه شماره ۷۱۲، ۱۵۲ ص.

سیفی، ا. و ریاحی، ح. ۱۳۹۶. پهنه‌بندی کیفی آبخوان شهربابک از منظر خورندگی و رسوب‌گذاری، تناسب کشاورزی، شرب و آبیاری تحت فشار. مجله آب و فاضلاب. ۵،۲۸: ۱۰۵-۹۲.

علیزاده، ا. ۱۳۹۳. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ سی و هشتم، ویرایش هفتم، ص ۲۹۳.

محمدی قلعه‌نی، م.، ابراهیمی، ک. و عراقی‌نژاد، ش. ۱۳۹۰. ارزیابی کمی و کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان‌های ساوه و اراک). دانش آب و خاک. ۲،۲۱: ۱۰۸-۹۳.

Afshar, A., Mariño, M.A., Saadatpour, M. and Afshar, A. 2011. Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun reservoirs system. Water Resources Management, 25.2: 545-563.

Aghazadeh, N. and Mogaddam, A.A. 2010. Assessment of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural uses in the Oshnavieh area, Northwest of Iran. Journal of Environmental Protection. 1.1: 30.

Alam, M., Rais, S. and Aslam, M. 2012. Hydrochemical investigation and quality assessment of ground water in rural areas of Delhi, India. Environmental Earth Sciences. 66.1: 97-110.

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.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R.A. and Tozer, R. G. 1970. A water quality index-Do we dare. Water Sewage Works. 117: 339- 343.

Chaturvedi, G.B., Mishra, B.B. and Tewari, D. D. 2008.Water quality index of groundwaters near industrial areas of Balrampur, UP. Nature Environment and Pollution Technology. 7.2: 331.

Chen, S. Z., Wang, X. J. and Zhao, X. J. 2008. An attribute recognition model based on entropy weight for evaluating the quality of groundwater sources. Journal of China University of Mining and Technology. 18.1: 72-75.

Chitsaz, N. and Azarnivand, A. 2017. Water scarcity management in arid regions based on an extended multiple criteria technique. Water Resources Management. 31.1: 233-250.

Dahiya, S., Singh, B., Gaur, S., Garg, V.K. and Kushwaha, H. S. 2007. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. Journal of Hazardous Materials. 147.3: 938-946.

Guo, T. Z., Xue, X. F. and Li, R. 2008. Application of TOPSIS in environmental quality assessment of Huafei River in Kaifeng. Meteorological and Environmental Sciences. 31.2: 59-62.

Hosseinifard, S. J. and Aminiyan, M. M. 2015. Hydrochemical characterization of groundwater quality for drinking and agricultural purposes: a case study in Rafsanjan plain, Iran. Water Quality, Exposure and Health. 7.4: 531-544.

368-373.

Madani, K. and Lund, J.R. 2011. A Monte-Carlo game theoretic approach for multi-criteria decision making under uncertainty. Advances in Water Resources. 34.5: 607-616.

Milovanovic, M. 2007. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. Desalination. 213.1-3: 159-173.

Mladenović-Ranisavljević, I. I., Takić, L. and Nikolić, Đ. 2018. Water Quality Assessment Based on Combined Multi-Criteria Decision-Making Method with Index Method. Water Resources Management. 32.7: 2261-2276.

Pei-Yue, L., Hui, Q. and Jian-Hua, W. U. 2010. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. Journal of Chemistry. 7.1: S209-S216.

Peiyue, L., Hui, Q. and Jianhua, W. U. 2011.Hydrochemical formation mechanisms and quality assessment of groundwater with improved TOPSIS method in Pengyang County Northwest China. Journal of Chemistry. 8.3: 1164-1173.

Ruparathna, R., Hewage, K. and Sadiq, R. 2018. Multi-period maintenance planning for public buildings: A risk based approach for climate conscious operation. Journal of Cleaner Production. 170: 1338-1353.

Sadat-Noori, S. M., Ebrahimi, K. and Liaghat, A. M. 2014.Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. Environmental Earth Sciences. 71.9: 3827-3843.

Sadi-Nezhad, S. and Damghani, K. K. 2010. Application of a fuzzy TOPSIS method base on modified preference ratio and fuzzy distance measurement in assessment of traffic police centers performance. Applied soft computing. 10.4: 1028-1039.

Sadi-Nezhad, S. and Damghani, K. K. 2010. Application of a fuzzy TOPSIS method base on modified preference ratio and fuzzy distance measurement in assessment of traffic police centers performance. Applied Soft Computing. 10.4: 1028-1039.

Salehi, S., Jalili Ghazizadeh, M. and Tabesh, M. 2018. A comprehensive criteria-based multi-attribute decision-making model for rehabilitation of water distribution systems. Structure and Infrastructure Engineering. 14.6: 743-765.

Shi-fei, D. and Zhong-zhi, S. 2005. Studies on incidence pattern recognition based on information entropy. Journal of Information Science. 31.6: 497-502.

Srinivas, R., Bhakar, P. and Singh, A. P. 2015.

Hosseini-Moghari, S. M., Ebrahimi, K. and Azarnivand, A. 2015. Groundwater quality assessment with respect to fuzzy water quality index (FWQI): an application of expert systems in environmental monitoring. Environmental Earth Sciences. 74.10: 7229-7238.

Hwang, C. L. and Yoon, K. 1981. Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making (pp. 58-191). Springer, Berlin, Heidelberg.

Hyde, K. M., Maier, H. R. and Colby, C. B. 2005.A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making. Journal of Environmental Management. 77.4: 278-290.

Jamshidzadeh, Z. and Mirbagheri, S. A. 2011. Evaluation of groundwater quantity and quality in the Kashan Basin, Central Iran. Desalination. 270.1-3: 23-30.

Jianhua, W., Peiyue, L., and Hui, Q. 2011. Groundwater quality in Jingyuan County, a semi-humid area in Northwest China. Journal of Chemistry, 8(2), 787-793.

Kelemenis, A. and Askounis, D. 2010. A new TOPSIS-based multi-criteria approach to personnel selection. Expert Systems with Applications. 37.7: 4999-5008.

Krishan, G., Singh, S., Kumar, C. P., Gurjar, S. and Ghosh, N. C. 2016. Assessment of water quality index (WQI) of groundwater in Rajkot district, Gujarat, India. Earth Science and Climate Change. 7.3.

Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M., and Machado, M. A. S. 2009. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. Ecological Indicators, 9(6), 1188-1197.

Li, P., Qian, H., Howard, K.W. and Wu, J. 2015. Building a new and sustainable "Silk Road economic belt". Environmental Earth Sciences. 74.10: 7267-7270.

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.

Li, P., Wu, J., Qian, H., Lyu, X. and Liu, H. 2014. Origin and assessment of groundwater pollution and associated health risk: a case study in an industrial park, northwest China. Environmental Geochemistry and Health. 36.4: 693-712.

Liu, R. T., Fu, Q. and Gai, Z. M. 2007. Entropy weight coefficient model and its application in evaluation of groundwater vulnerability of the Sanjiang Plain. Journal of Northeast Agricultural University. 14.4:

using multi-criteria decision making methods. Journal of African Earth Sciences. 138: 309-318.

Zahedi, S. 2017. Modification of expected conflicts between drinking water quality index and irrigation water quality index in water quality ranking of shared extraction wells using multi criteria decision making techniques. Ecological Indicators. 83: 368-379.

Zahedi, S., Azarnivand, A. and Chitsaz, N. 2017. Groundwater quality classification derivation using multi-criteria-decision-making techniques. Ecological Indicators. 78: 243-252.

Groundwater quality assessment in some selected area of Rajasthan, India using fuzzy multi-criteria decision making tool. Aquatic Procedia. 4: 1023-1030.

Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Ganthi, R. R., Chidambaram, S., Anandhan, P. and Vasudevan, S. 2010. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. Environmental Monitoring and Assessment. 171.1-4: 595-609.

Yousefi, H., Zahedi, S. and Niksokhan, M. H. 2018. Modifying the analysis made by water quality index

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 13, Agu.-Sept. 2019, p. 699-714

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۳، مرداد - شهریور ۱۳۹۸، ص. ۷۱۴-۶۹۹

Hybridizing of TOPSIS Multi Criteria Decision Making Technique with Entropy for Ranking of Groundwater Quality and Groundwater Pollution risk

A. Seifi[1*], F. Soroush[2]

Recived: Aug.27, 2018 Accepted: Oct.06, 2018

Abstract

In this study, the suitability of groundwater quality for drinking proposes and wells ranking have been investigated using two techniques including water quality index (WQI) and hybrid TOPSIS-entropy theory (ETOPSIS) for 36 wells located in Shahr-e-Babak aquifer. During the WQI calculating process, the weight of each parameter is usually given by expert's experience and chemical parameters with low weights but high concentration values (or vice versa) reduces evaluation stability. So, the hybrid ETOPSIS method has been developed. In ETOPSIS method, the weight of each parameter is calculated using entropy-based weighting approach. Also, normalizing each single parameter in ETOPSIS is to consider the effect of each qualitative parameter besides their overall influence in ranking of wells. Also, in this study, pollution risk-based prioritization of wells has been applied according to time consequences of pollution in seven years and probability of pollution for the first time. According to WQI results based on 1053 standard, over 8 and 17 % of wells were in the class of "excellent" and "good" quality, respectively. Using ETOPSIS technique, the well number 11 ranked as the best and first well that had lowest pollution risk (TC = 0.95), but this well achieved the fourth rank and classified as well with "good" water quality by WQI method (WQI = 54.4). Investigation of chemical parameters confirmed the validity of the ETOPSIS results. Calculation of entropy weighting showed that concentration of Mg and HCO_3 with same entropy weight equal to 0.17 have highest impact and pH with entropy weight equal to 0.05 has minimal influence on the ETOPSIS ranking. The low pollution risk recognized in Eastern parts of study region, but it was high and dangerous in West and Southern west. The wells risk ranks that obtained from WQI and ETOPSIS based on 50 % pollution threshold were correlate with R^2 = 0.951. Based on the results indicate that application of ETOPSIS could produce useful and more reliable results than WQI.

Keyword: Prioritization, Shahr-e-Babak aquifer, Time consequences of pollution, Water quality index, Zoning.

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.seifi@vru.ac.ir)