

ارائه و ارزیابی یک روش پیشنهادی در تعیین مناسب‌ترین کاربرد پساب

مهدی رحیمی^۱، کیومرث ابراهیمی^۲، شهاب عراقی نژاد^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۳/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۲۴)

چکیده

افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف، باعث افزایش اهمیت استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه‌شده (پساب) برای کاربردهای گوناگون شده است. هدف از مقاله حاضر ارائه یک روش پیشنهادی در تعیین مناسب‌ترین کاربرد پساب بر اساس سطح کیفیت آن است. برای نیل به این هدف مشخصات ۶۰ نمونه پساب ماهانه برای پنج سال (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵) و شانزده پارامتر از هر نمونه از تصفیه‌خانه شهر اراک تهیه و پس از تعیین شش گزینه ممکن مصرف پساب، پارامترهای مناسب انتخاب و پس از تدوین دو شاخص با کاربرد رویکردهای فازی و آنتروپی ضمن ارزیابی شاخص‌های پیشنهادی، بهترین گزینه استفاده از پساب در هر حالت تعیین شد. بر اساس نتایج مشخص شد که شاخص‌های پیشنهادی ضمن حساس بودن به پارامترها و سطح کیفیت پساب، کاربرد پساب را به خوبی تعیین نموده‌اند. به طوری که نتایج نشان داد که کیفیت پساب تصفیه‌خانه شهر اراک در پنج سال اخیر بهبود یافته و در سال پنجم، پساب این تصفیه‌خانه علاوه بر تولید علوفه دام و آبیاری فضای سبز در کاربری‌های صنعت، سبزی‌های پخته و تولید دانه‌های روغنی و تغذیه مصنوعی آبخوان نیز قابل استفاده تشخیص داده شده است. این در حالی است که پساب سال ۱۳۹۱ فقط برای آبیاری فضای سبز و تولید علوفه تأیید شده است.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفی پساب، استنتاج فازی، آنتروپی، تحلیل عاملی، تصفیه‌خانه شهر اراک.

مقدمه

افزایش جمعیت شهرنشین، پیشرفت‌های صنعتی و افزایش مصرف آب از یک طرف و کمبود شدید منابع آب تازه به خصوص در کشورهای گرم و خشک همچون ایران از طرف دیگر اهمیت استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه‌شده را برای مقاصدی که نیاز به آب با کیفیت مناسب ندارد، دوچندان کرده است. تاکنون بسیاری از کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته، شاخص‌های متفاوتی در زمینه ارزیابی و کاربری منابع آب تازه که علاوه بر اینکه در شرایط منطقه‌ای دارای اعتبار کافی هستند، بتوان از آن استفاده گسترده‌ای شود، ارائه داده‌اند؛ اما مطالعات و تلاش‌ها در زمینه تهیه و تدوین شاخص‌های کیفی پساب که در عین سادگی و دقت، متغیرهای کیفی محدودتری نیاز داشته و در نتیجه با صرف وقت و هزینه کمتر، بتوان منابع پساب تصفیه‌شده شهری را مورد پایش مستمر قرار داد، بسیار محدود است. از جمله روش‌هایی که امروزه در ارزیابی کیفیت آب مورد

استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به روش‌های منطق فازی^۱، تحلیل عاملی^۲ و پردازش سلسله مراتبی تحلیلی^۳ (AHP) اشاره کرد. اغلب شاخص‌های کیفی آب ارائه‌شده دارای پیچیدگی و منطق قطعیت‌گرا هستند (Nasseri, 2013). با وجود فعالیت‌های انجام‌شده در این زمینه، کمتر به مسئله پساب و تهیه شاخص کیفی مربوط به آن پرداخته شده است. از میان روش‌ها و مطالعات متنوع ارائه‌شده در منابع مختلف پیرامون ارزیابی کیفیت آب به روش فازی و آنتروپی، در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Niko and Karachian (2010) به بررسی کیفیت آب رودخانه جاجرود با تلفیق سیستم استنتاج فازی و شبکه‌های بیزی پرداختند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی کیفیت رودخانه جاجرود، کارایی مدل پیشنهادی ایشان را نشان داد. Hoseini Mohammadi Moghari *et al* (2015) در ادامه نتایج Ghalenei and Ebrahimi (2015) برای ارزیابی کیفیت منابع

1. Fuzzy Logic
2. Factor Analysis
3. Analytic Hierarchy Process

* نویسنده مسئول : EbrahimiK@ut.ac.ir
<http://can.ut.ac.ir/member/ebrahimi.aspx>

کیفیت آب زیرزمینی منطقه جینگیان^۵ در چین پرداختند. تحقیقات ایشان نشان داد که نمونه‌های موردبررسی دارای کیفیت مناسبی برای شرب می‌باشد. در بحث فاضلاب تصفیه‌شده شهری Verlicchi *et al* (2010) شاخص کیفی پساب در ایتالیا را با توجه به استانداردهای این کشور تخمین زدند. در تحقیق اخیر، شش متغیر کیفی SS, COD, BOD, Total Phosphorus, E.Coli, NH₄ براساس تحقیقات قبلی انتخاب و وزن این متغیرها یکسان در نظر گرفته شد. به‌استثنای E.coli که وزن ۱/۴ به دلیل اهمیت بیشتر آن انتخاب شد. بر اساس مرور منابع انجام‌شده، می‌توان به کمبود مطالعات برای بررسی کیفیت پساب پی برد. هدف اصلی مقاله حاضر علاوه بر مقایسه دو شاخص نوین کیفی آب فازی و آنتروپی، تعیین بهترین نوع کاربری برای استفاده از پساب می‌باشد. ضمناً در مقاله حاضر دو شاخص استفاده‌شده، شاخص کیفیت پساب فازی^۶ (FEQI) و شاخص کیفیت پساب آنتروپی^۷ (EEQI) نامیده شدند.

مواد و روش‌ها

در مقاله حاضر ابتدا شش نوع کاربری معمول، شامل استفاده از پساب در صنعت، آبیاری فضای سبز و چمنزار، تهیه علوفه دام، تولید سبزیجات پخته و تولید دانه‌های روغنی، رهاسازی آب سطحی و تفرج و تغذیه مصنوعی مدنظر قرار گرفت. سپس با توجه به پارامترهای استفاده‌شده در روش‌های مختلف پرکاربرد ارزیابی کیفیت آب در زمینه‌های کشاورزی، شرب و محیط‌زیست مانند روش شولر، FAO، ویلکوکس و WQI و همچنین اهمیت پارامترها در هر نوع کاربری، شانزده پارامتر به‌عنوان پارامترهای منتخب تعیین شد. این پارامترها به‌گونه‌ای انتخاب شد که بتواند ویژگی کاربری‌های مشخص‌شده را توصیف کند. پارامترها شامل کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، نیترات (NO₃)، فسفات (PO₄)، pH، میزان اکسیژن بیوشیمیایی موردنیاز (BOD₅)، کل مواد محلول (TDS)، کل مواد جامد معلق (TSS)، کلیفرم مدفوعی، تخم انگل، آرسنیک (As)، کروم (Cr)، سرب (Pb)، جیوه (Hg)، کادمیوم (Cd) و آلومینیوم (Al) می‌باشند. پس از معرفی کاربری‌های ممکن برای استفاده از پساب و پارامترهای توصیف‌کننده ویژگی این کاربری‌ها، شاخص‌های کیفی پساب با رویکرد فازی (FEQI) و همچنین آنتروپی (EEQI) برای هرکدام از کاربری‌ها محاسبه شد و درنهایت با توجه به نتایج، گزینه‌های برتر برای استفاده از پساب

آب زیرزمینی ساوه، شاخص فازی پایش کیفی منابع آب^۱ (FWQI) را توسعه دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که در غیاب برخی از پارامترها، شاخص‌های FWQI با دقت زیادی قادر به ارزیابی منابع آب زیرزمینی هستند. همچنین مشخص شد که اگر در میان پارامترهای ورودی، پارامتری که دارای مقداری خارج از محدوده مطلوب خود باشد، حذف شود، در طبقه‌بندی کیفی آب ایجاد خطا خواهد نمود. Dahiya *et al* (2007) روش استنتاج فازی برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی در مصارف شرب ۳۶ نمونه از کشور هند استفاده کردند. در پژوهش ایشان، سطوح اطمینان مربوط به هر یک از نمونه‌ها تعیین گردید و برتری این روش نسبت به روش‌های تعیین شاخص کیفیت آب مشخص شد.

معمولاً در شاخص کیفیت آب^۲ (WQI)، وزن هر پارامتر به‌طور تجربی و بر اساس نظر کارشناسان تعیین می‌شود. در این مطالعه از رابطه بهینه‌شده WQI که در آن از وزن آنتروپی استفاده شده است، بهره گرفته شد. در همین زمینه می‌توان به مطالعات متعددی اشاره کرد. Amiri *et al* (2014) از یک شاخص کیفی برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از آنتروپی استفاده کردند. در تحقیق ایشان آب زیرزمینی لنجان اصفهان بر اساس استانداردهای WHO و ایران برای آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای موردبررسی شامل: هدایت الکتریکی، pH، TDS، کلسیم، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کربنات، سولفات، کلر، فسفر و نیترات بود. در تحقیق مذکور برای جلوگیری از قضاوت‌های کارشناسی در مورد وزن پارامترها از روش آنتروپی استفاده شد و سپس شاخص کیفیت بر اساس این وزن‌ها و استانداردها تهیه شد. Fang Fang *et al* (2017) برای ارزیابی کمی ویژگی‌های ذرات و توده لجن فعال از یک رویکرد فازی-آنتروپی استفاده کردند. آن‌ها برای تعیین وزن پارامترهای موردنظر از دو روش سلسله مراتبی فازی و آنتروپی استفاده کردند و سپس نتایج این دو روش را تلفیق کرده و با رویکرد فازی به ارزیابی کمی ویژگی‌های ذرات و توده لجن فعال پرداختند. در مطالعه‌ای که Pei-Yue *et al* (2010) در منطقه پنجینگ^۳ در شمال غرب چین انجام دادند، ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص آنتروپی وزن‌دار کیفیت آب^۴ (EWQI)، نتایجی قابل‌اعتماد و مناسبی در اختیار قرار داد. Jian-Hua *et al* (2011) با استفاده از EWQI به تحلیل وضعیت

5. Jingyan
6. Fuzzy Effluents Quality index
7. Entropy Effluents Quality index

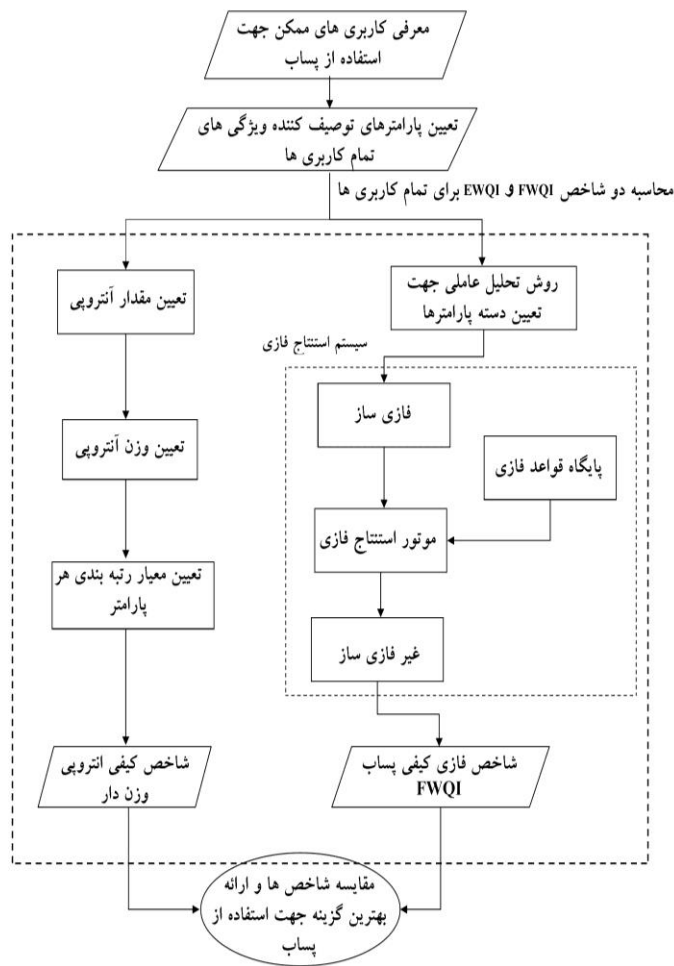
1. Fuzzy Water Quality Index
2. Water Quality Index
3. Pengyang
4. Entropy Water Quality Index

آن‌ها در هر سال به‌دست آمد که خلاصه آن در جدول (۱) ارائه شده است. در حال حاضر پساب خروجی این تصفیه‌خانه به‌طور عمدی در بخش‌های کشاورزی، فضای سبز و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انتخاب شد. روندنمای مقاله حاضر در شکل (۱) آمده است.

داده‌های مورد استفاده

پارامترهای اندازه‌گیری شده پساب از تصفیه‌خانه شهر اراک برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ به‌صورت ماهانه تهیه و سپس میانگین



جدول ۱- خلاصه آماری پارامترهای انتخابی پساب تصفیه‌خانه اراک در دوره ۱۳۹۱-۱۳۹۵

پارامتر	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
pH	۸/۶۰	۷/۳۶	۷/۸۷	۰/۳۱
BOD ₅	۷۲	۱۴	۲۵/۱۳	۱۰/۰۶
NO ₃	۲۹	۰/۹۸	۸/۷۱	۸/۴۳
PO ₄	۵۷	۱	۱۵/۸۵	۱۰/۲۲
TDS	۹۲۶	۴۵۲	۶۷۷/۳۶	۷۷/۲۷
TSS	۲۱۲	۳۲	۷۸/۶۹	۴۱/۲۶
Ca	۱۰۴/۲۰	۶۴	۸۱/۴۲	۹/۰۴
Mg	۴۱/۷۹	۱۸/۲۷	۲۸/۳۵	۴/۸۸
As	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۰۴۴۷
Cd	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲۲	۰/۰۰۴۴۷
Hg	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۷۰۷
Pb	۰/۲	۰/۱	۰/۱۴	۰/۰۵۴۷
Cr	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۶۶	۰/۰۸۹۴۴
Al	۳/۶	۰/۳	۲/۹۴	۱/۴۷۵۸
تخم انگل	۲	۰	۰/۴۵	۰/۱۶۶۳
کلیفرم مدفوعی	۱۶۰۰	۷۹	۱۳۱۸/۴۴	۴۸۵/۴۲

* واحد تمام پارامترها برحسب میلی‌گرم بر لیتر است، به‌استثنای کلیفرم مدفوعی و تخم انگل که برحسب تعداد در ۱۰۰ میلی‌گرم است.

شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی تعیین بهترین گزینه کاربری استفاده از پساب

تأثیر بیشتری در تصمیم‌گیری برخوردار خواهد بود. لذا برای تعیین وزن و اهمیت هر یک از معیارها، با محاسبه میزان عدم اطمینان (ضد آنتروپی) هر کدام، وزن آن‌ها مشخص می‌شود (Ozkul, 2000; Kawachi, 2001).

مراحل محاسبه و کاربرد آنتروپی برای تعیین وزن آنتروپی و EEQI در این مقاله به این صورت است که اگر فرض کنیم m نمونه آب ($i=1,2,\dots,m$) و از هر نمونه نیز n پارامتر ($j=1,2,\dots,n$) برای ارزیابی کیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر اساس داده‌های مشاهداتی ماتریس مقادیر ویژه X به‌صورت زیر خواهد بود (Shannon, 1948). در مقاله حاضر از ۶۰ نمونه پساب

استفاده از تکنیک آنتروپی در محاسبه EEQI

مفهوم آنتروپی اولین بار توسط شانون^۱ (۱۹۴۸) ارائه شد و برای بیان عدم قطعیت یک رخداد تصادفی یا مقدار بار اطلاعاتی یک پارامتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Guey-Shin, 2011). آنتروپی در علوم فیزیک و نظریه سیستم‌ها به معنی بی‌نظمی و در علوم ارتباطات و اطلاعات بیانگر اطمینان موجود در اطلاعات مشخصی می‌باشد. هرچه معیاری از عدم قطعیت (ضد آنتروپی) بیشتری یا آنتروپی کمتری برخوردار باشد از وزن و اهمیت و

1. Shannon

به صورت ماهانه برای پنج سال و از هر نمونه نه پارامتر در تعیین ماتریس مقادیر ویژه استفاده شد.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در ادامه داده‌ها را بر اساس نوع کارایی با استفاده از رابطه (۲)، برای کاهش تأثیر اختلاف واحد پارامترهای کیفی نرمال‌سازی شد.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

پس از نرمال‌سازی داده‌های خام، ماتریس استاندارد داده‌ها به صورت زیر تشکیل شد.

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۳})$$

سپس ماتریس تصمیم‌گیری را که مربوط به پارامتر z در نمونه i است را بر اساس معادله زیر بی‌بعد شد:

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در ادامه میزان آنتروپی E_j هر معیار با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد:

$$E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (\text{رابطه ۵})$$

وزن آنتروپی هر پارامتر با استفاده از رابطه زیر تعیین شد. لازم به ذکر است که صورت کسر نشان‌دهنده ضدآنتروپی یا عدم اطمینان است و هر چه مقدار آنتروپی کمتر باشد میزان تأثیر پارامترز بیش‌تر خواهد بود.

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{i=1}^m (1 - E_j)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

میزان شاخص EEQI با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد که در آن q_j معیار رتبه‌بندی کیفی هر پارامتر و ω_j وزن آنتروپی پارامتر زاست (Jian-Hua, 2011).

$$EEQI = \sum_{i=1}^m \omega_j q_j \quad (\text{رابطه ۷})$$

q_j در حالت کلی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد که در آن C_j غلظت هر پارامتر و S_j غلظت همان پارامتر بر اساس استانداردهای ارائه شده می‌باشد.

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

به دلیل محدود بودن تغییرات pH، مقدار معیار رتبه‌بندی آن نیز کوچک می‌باشد و به همین علت از رابطه زیر برای تعیین معیار رتبه‌بندی pH استفاده شد.

$$q_{pH} = \frac{C_{pH} - S_l}{S_{pH} - S_l} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این رابطه، C_{pH} مقدار pH مشاهداتی و همچنین S_l و S_{pH} به ترتیب بیش‌ترین مقدار pH مجاز در هر کاربری و مقدار ایده‌آل pH می‌باشد. در مقاله حاضر تلفیقی از استانداردهای مربوط به موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI 2439; ISIRI 1053)، استاندارد ارائه‌شده فائو (FAO, 1973) و استاندارد فاضلاب‌های تصفیه‌شده مورد استفاده در آبیاری (WHO, 2004; EPA, 2006) پیشنهاد شده که در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس شاخص آنتروپی وزن‌دار کیفی آب و پیشنهاد پی یو (۲۰۱۰)، می‌توان کیفیت پساب را در پنج دسته بسیار خوب، خوب، متوسط، بد و بسیار بد تقسیم کرد که در جدول (۳) آمده است (Pei-Yue, 2010).

جدول ۲- استانداردهای پیشنهادی مقاله حاضر برای هر کاربری (تلفیقی از استاندارد ایران، فائو و WHO)

نوع کاربری	TDS	مدفوعی	کلیرم	Mg	Ca	TSS	PO ₄	NO ₃	BOD ₅	pH	pH _{max}	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Al
علوفه دام و چمنزار	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۶۰	۴۰۰	۲۵۰	۲۰	۵۰	۲۵۰	۶	۹	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۱	۵
سبزیجات پخته و دانه‌های روغنی	۴۰۰	۱۰۰۰	۶۰	۴۰۰	۲۵۰	۶	۵۰	۱۵۰	۶	۹	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۱	۵
فضای سبز	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۶۰	۴۰۰	۲۵۰	۱۵	۲۵	۵۰	۶	۹	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۱	۵
آب‌های سطحی و تفرج	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۷۵	۴۰	۶	۵۰	۳۰	۶/۵	۸/۵	۰/۱	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۰/۵	۵
تغذیه مصنوعی	۴۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۶	۱۰	۳۰	۵	۹	۰/۱	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۱	۵
صنعت	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۷۵	۱۲۰	۲۰	۵۰	۲۵۰	۶	۹	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱	۲	۵

واحد تمام پارامترها برحسب میلی‌گرم بر لیتر است، به‌استثنای کلیرم مدفوعی که برحسب تعداد در هر ۱۰۰ میلی‌گرم است.

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \text{ or } c \leq x \\ \frac{a-x}{a-b} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

جدول ۳- رده‌بندی شاخص کیفی پساب EEQI

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

تعیین دقیق میزان تأثیر هر پارامتر یا هر دسته از پارامترها بر شاخص کیفی پساب از طریق روش تحلیل عاملی انجام شد. روش مذکور روشی است برای بررسی اینکه چگونه تعدادی متغیر به تعداد کمتری عوامل مشاهده نشده به صورت خطی مرتبط شوند. روش تحلیل عاملی به‌طور کلی به دو نوع «استخراجی و تأییدی» تقسیم می‌شود. زمانی که هیچ پیش‌فرضی درباره عوامل وجود ندارد و یا پیش‌فرض وجود دارد اما نه به صورت دقیق، از روش اول استفاده می‌شود؛ اما زمانی که فرض‌های اولیه‌ای درباره عوامل وجود دارد، برای تأیید فرض‌ها از روش دوم استفاده می‌شود (Guey-Shin, 2011). در مقاله حاضر از روش استخراجی استفاده شده است. نتایج تحلیل عاملی نه پارامتر مربوط به پساب خروجی تصفیه‌خانه شهر اراک در سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ در جدول (۴) آمده است. لازم به ذکر است که پارامترهای فلزات سنگین و تخم انگل به دلیل تفاوت در ماهیت نسبت به سایر پارامترها و داشتن دو تابع عضویت، در قالب دسته‌های جداگانه تقسیم‌بندی شدند.

جدول ۴- مقدار بار چرخش یافته عامل‌ها بر اساس چرخش

Varimax			پارامترها
عامل			
۳	۲	۱	
۰/۳۱۴		۰/۷۵	pH
	۰/۵۶۵	۰/۴۳۵	BOD ₅
	۰/۸۹۳		NO ₃
	۰/۸۸۱		PO ₄
۰/۵۱۴		۰/۷۰۵	TDS
۰/۸۲۶			TSS
۰/۶۶۳			Ca
۰/۴۲۰		۰/۳۵۱	Mg
		۰/۷۳۴	کلیفرم مدفوعی
۱/۵۰۹	۱/۸۷۳	۲/۱۸۸	مقدار ویژه
۱۹/۷۶۶	۲۳/۸۰۸	۲۷/۳۰۶	درصد واریانس
۷۰/۸۸	۵۱/۱۱۴	۲۷/۳۰۶	درصد تجمعی واریانس

کاربرد سامانه استنتاج فازی در محاسبه FEQI

اولین بار لطفی‌زاده (۱۹۶۵) مفهوم زبان‌شناختی یا متغیرهای فازی را ارائه کرد. یکی از ویژگی‌های منطق فازی، ساختار قانون پایه منطق فازی است که طی آن مسائل کنترلی به یک سری قوانین اگر-آنگاه تبدیل می‌شوند که پاسخ‌گوی خروجی مطلوب سیستم برای شرایط ورودی سیستم می‌باشد. سامانه استنتاج فازی^۱ (FIS) بر پایه همین قوانین بنا شده است. در هر قانون، به بخشی که در آن، شرط‌ها بیان می‌شوند «مقدم» و به بخش مربوط به نتیجه «تالی» گفته می‌شود. استنتاج فازی از ترکیب منطق فازی با سامانه‌های خبره^۲ ایجاد می‌شود (Yager, 1994). سامانه استنتاج فازی از چهار بخش، پایگاه قواعد فازی^۳، موتور استنتاج فازی، فازی‌ساز^۴ و غیرفازی‌ساز^۵ تشکیل شده‌اند.

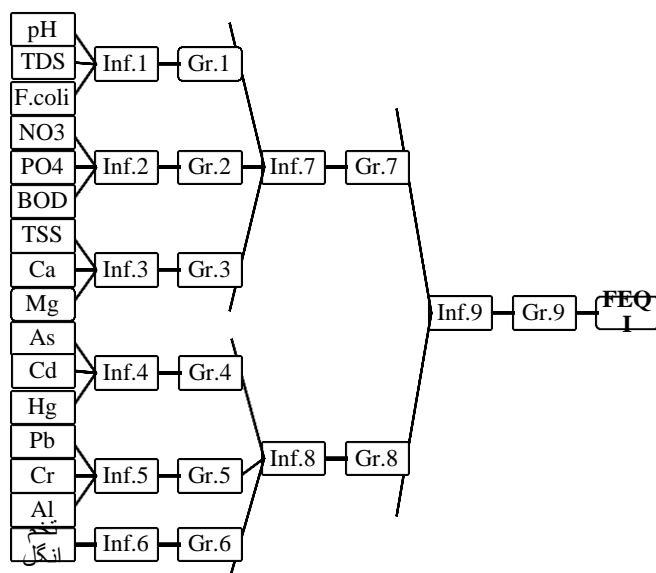
تاکنون مدل‌های فازی مختلفی توسط محققین ارائه شده است. مهم‌ترین این مدل‌ها، مدل ممدانی و سوگنو هستند. سامانه‌های فازی ممدانی، به علت سادگی، کارایی و متناسب بودن آن برای مسائل زیست‌محیطی، در مسائل کیفیت آب استفاده زیادی دارد (Gharibi, 2012; Icaga, 2007). به همین دلیل در تحقیق حاضر از مدل فازی ممدانی برای طبقه‌بندی کیفی پساب استفاده شد. برای توسعه و طراحی سامانه فازی کیفی پساب برای هر شانزده پارامتر توابع عضویتی در نظر گرفته شد. مقدار عددی متغیر در هر تابع عضویت، دارای یک درجه عضویت است که بر اساس این درجه عضویت، تأثیر مقدار آن در خروجی قانون منظور و مشخص شد. این توابع بر اساس استانداردهای موجود برای هر کاربری جهت استفاده از پساب تعیین شد که با توجه به رابطه‌های زیر به صورت مثلثی یا دوزنقه طراحی شدند (برای مطالعه بیشتر به Zadeh, 1965 مراجعه شود).

1. Fuzzy Inference System
2. Expert Systems
3. Fuzzy Rule Base
4. Fuzzifier
5. Defuzzifier

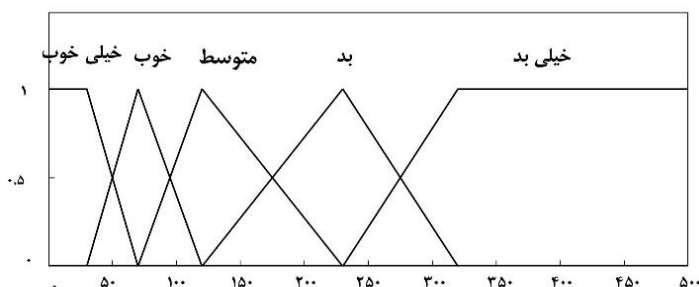
همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، می‌توان بیش از ۷۰ درصد از تغییرات کیفی پساب را توسط سه عامل

به دلیل وجود pH دارای ۲۲۵ قانون و یک خروجی است. FIS دوم و سوم که به ترتیب از پارامترهای عامل دوم و سوم تشکیل شده‌اند، دارای ۱۲۵ قانون و یک خروجی هستند و همچنین خروجی‌های حاصل از این سه سامانه استنتاج فازی ورودی‌های FIS هفتم را تشکیل می‌دهند که خروجی این FIS بر اساس ۱۲۵ قانون نوشته شده است. FIS چهارم و پنجم مربوط به فلزات سنگین است که به دلیل وجود دو تابع عضویت در آن‌ها با هشت قانون و FIS ششم تنها با یک پارامتر و دو قانون تعریف شده است. در نهایت این سامانه استنتاج فازی شاخص FEQI را ایجاد می‌کند. مشخصات توابع عضویت مربوط به FEQI در شکل (۳) آمده است که براساس این تابع عضویت، کاربری‌هایی که در محدوده خوب و خیلی خوب قرار می‌گیرند، قابل استفاده می‌باشند.

مورد بررسی قرار داد. عامل ۱ با بیش از ۲۷ درصد تغییرات دارای بیش‌ترین نقش بوده و پس‌از آن عامل ۲ با بیش از ۲۳ درصد و سپس عامل ۳ با بیش از ۱۹ درصد تغییرات مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت پساب شهر اراک هستند. همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود عامل ۱ شامل پارامترهای pH، TDS و کلیفرم مدفوعی است که در تمام کاربری مهم تلقی می‌شوند و عامل ۲ شامل BOD_5 ، NO_3 و PO_4 است که نقش مهمی در کاربری به‌عنوان تغذیه مصنوعی، آب سطحی و تفرج و کشاورزی دارند و همچنین عامل سوم پارامترهای TSS، کلسیم و منیزیم را در خود جای داده است که این عامل در کاربری صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شاخص FEQI مطابق شکل (۲) از نه FIS تشکیل شده است. در FIS اول پارامترهای عامل اول گنجانده شده است که



شکل ۲- نمودار فرآیند پیشنهادی طراحی شاخص کیفی فازی پساب



شکل ۳- مشخصات توابع عضویت FEQI

کیفیت آب مشکل‌آفرین است به همین دلیل برای این پارامتر نه پنج تابع عضویت در نظر گرفته شد. پارامتر pH شرایط خاصی دارد زیرا هم مقادیر کم و هم مقادیر زیاد این پارامتر، در مسائل

برای پارامترهای FIS اول تا سوم به‌استثنای پارامتر pH، پنج تابع عضویت در نظر گرفته شد. پارامتر pH شرایط خاصی دارد زیرا هم مقادیر کم و هم مقادیر زیاد این پارامتر، در مسائل

جدول ۵- مشخصات توابع عضویت پارامترها در کاربری فضای سبز

pH				pH				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۶/۷۵	۷/۵	۸/۲۵	-	-	-	-	-	خیلی خوب
۶	۶/۷۵	۷/۵	-	۷/۵	۸/۲۵	۹	-	خوب
۵	۶	۶/۷۵	-	۸/۲۵	۹	۱۰	-	متوسط
۴	۵	۶	-	۹	۱۰	۱۱	-	بد
۰	۰	۴	۵	۱۰	۱۱	۱۴	۱۴	خیلی بد
کلیفرم مدفوعی				TDS				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۰	۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	خیلی خوب
۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	-	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	-	خوب
۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	-	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	-	متوسط
۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	-	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰	بد
۳۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۷۰۰۰	خیلی بد
NO ₃				PO ₄				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۱۰	۲۵	۰	۰	۵	۱۵	خیلی خوب
۱۰	۲۵	۳۵	-	۵	۱۵	۳۰	-	خوب
۲۵	۳۵	۵۵	-	۱۵	۳۰	۵۰	-	متوسط
۳۵	۵۵	۶۵	-	۳۰	۵۰	۸۰	-	بد
۵۵	۶۵	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	خیلی بد
BOD ₅				TSS				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۳۰	۷۰	۰	۰	۲۰	۵۰	خیلی خوب
۳۰	۷۰	۱۲۰	-	۲۰	۵۰	۸۰	-	خوب
۷۰	۱۲۰	۲۳۰	-	۵۰	۸۰	۱۲۰	-	متوسط
۱۲۰	۲۳۰	۳۲۰	-	۸۰	۱۲۰	۱۸۰	-	بد
۲۳۰	۳۲۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۲۰	۱۸۰	۲۵۰	۲۵۰	خیلی بد
Ca				Mg				پارامتر
a	b	c	d	a	B	c	d	وضعیت
۰	۰	۲۰۰	۴۰۰	۰	۰	۲۰	۶۰	خیلی خوب
۲۰۰	۴۰۰	۵۰۰	-	۲۰	۶۰	۸۰	-	خوب
۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	-	۶۰	۸۰	۱۰۰	-	متوسط
۵۰۰	۶۰۰	۶۵۰	-	۸۰	۱۰۰	۲۰۰	-	بد
۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۳۰۰	خیلی بد
Cd				As				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۰	۰	۰/۰۵	۰/۱۵	قابل استفاده
۰/۰۲۵	۰/۰۷۵	۱	۱	۰/۰۵	۰/۱۵	۱	۱	غیر قابل استفاده
Pb				Hg				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۰/۵	۱/۵	۰	۰	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	قابل استفاده
۰/۵	۱/۵	۳	۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۱	۱	غیر قابل استفاده
Cr				Al				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۰/۵	۱/۵	۰	۰	۴	۶	قابل استفاده
۰/۵	۱/۵	۳	۳	۴	۶	۱۰	۱۰	غیر قابل استفاده
تخم انگل				تخم انگل				پارامتر
a	b	c	d	a	b	c	d	وضعیت
۰	۰	۰/۵	۱/۵	۰	۰	۰/۵	۱/۵	قابل استفاده
۰/۵	۱/۵	۲	۲	۰/۵	۱/۵	۲	۲	غیر قابل استفاده

تهیه شد. در پژوهش حاضر، سامانه استنتاج فازی برای هر شش نوع کاربری در نظر گرفته شد. به عنوان مثال توابع عضویت کاربری فضای سبز در جدول (۵) و همچنین چند قانون تشکیل دهنده این سامانه در جدول (۶) ارائه شده است.

عضویت تشکیل شده اند؛ زیرا در صورتی که مقدار آن ها کمی از استاندارد بالاتر باشد؛ پساب غیر قابل استفاده معرفی می شود. توابع عضویت برای هر پارامتر در هر نوع کاربری به دلیل شرایط خاص و همچنین استانداردهای موجود متفاوت است بنابراین برای هر پارامتر، با توجه به نوع کاربری توابع عضویت جداگانه

جدول ۶- برخی قوانین استفاده شده در توسعه شاخص FEQI برای کاربری فضای سبز

تالی	مقدم						شماره قانون	FIS
	باشد	و اگر	باشد	و اگر	باشد	اگر		
آنگاه	باشد	و اگر	باشد	و اگر	باشد	اگر	۵	خروجی ۱
خیلی بد	خیلی بد	کلیفرم	خیلی خوب	TDS	خیلی بد	pH	۲۴	
خیلی بد	بد	کلیفرم	خیلی بد	TDS	خیلی بد	pH	۷۵	
خوب	خیلی خوب	کلیفرم	خیلی خوب	TDS	خوب	pH	۲۰۸	
متوسط	بد	کلیفرم	خوب	TDS	خوب	pH		

خیلی بد تعیین شد. این قوانین به دلیل اهمیت و خطرات استفاده از پساب بر سلامت انسان و محیط زیست، به صورت سخت گیرانه تدوین شدند. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر، برای طراحی سامانه استنتاج فازی و تعیین وزن آنتروپی از نرم افزار متلب استفاده شد.

نتایج و بحث

پس از بررسی های اولیه و تحلیل روابط بین پارامترها با استفاده از تحلیل عاملی و همچنین تدوین شاخص کیفی فازی پساب برای هر کاربری با استفاده استانداردهای موجود، به منظور محاسبه شاخص EEQI، وزن پارامترها، با توجه به روابط (۱) تا (۶) تعیین شد. نتایج مربوط به محاسبه مقدار وزن آنتروپی هر پارامتر در جدول (۷) ارائه شده است.

همان طور که در جدول (۵) مشخص است، پارامتر pH دارای نه تابع عضویت است که حد متوسط این پارامتر در بازه ۹ – ۶/۷۵ در نظر گرفته شده است که مقادیر کمتر و بیش تر آن، تأثیر منفی بر کیفیت آب می گذارد. سایر پارامترها دارای پنج تابع عضویت می باشند که بر اساس استانداردهای موجود و محدوده تغییرات هر پارامتر تهیه شده است. توابعی که دارای چهار مقدار می باشند مربوط به تابع عضویت ذوزنقه و توابع دارای سه مقدار مربوط به توابع عضویت مثلثی می باشند. به طور مثال در جدول (۵) چند نمونه از قوانین استفاده شده در توسعه شاخص FEQI، برای کاربری فضای سبز را نشان می دهد. همان طور که از قوانین جدول (۶) مشخص است، در قانون ۷۵ با وجود اینکه دو پارامتر در محدوده خیلی خوب است ولی نتیجه در محدوده خوب در نظر گرفته شد و همچنین در قانون ۵ با وجود دو پارامتر خیلی بد و یک پارامتر خیلی خوب، تالی

جدول ۷: وزن آنتروپی برای هر پارامتر

پارامتر	BOD ₅	NO ₃	PO ₄	TSS	Ca	Mg	pH	TDS
وزن آنتروپی	۰/۰۵۰۶	۰/۰۵۲	۰/۱۰۹	۰/۱۱۲۸	۰/۰۶۹۶	۰/۰۶۹۸	۰/۰۸۰۳	۰/۰۷۹۵
پارامتر	As	Cd	Hg	Pb	Cr	Al	تخم انگل	کلیفرم مدفوعی
وزن آنتروپی	۰/۰۳۰۹	۰/۰۲۲۵	۰/۰۳۱۵	۰/۰۴۹۷	۰/۰۳۰۵	۰/۰۵۲۹	۰/۰۶۶۹	۰/۰۹۹۵

دارای بیش ترین ناپایداری و تغییرات می باشد. همان طور که در قسمت مواد و روش ها ذکر شد، با استفاده از وزن آنتروپی به دست آمده و استانداردهای موجود برای هر کاربری و روابط (۱) تا (۹) برای محاسبه شاخص کیفی آنتروپی وزن دار، مقادیر این شاخص محاسبه شد و به تحلیل و مقایسه آن با شاخص FEQI پرداخته شد که نتایج آن در شکل

در جدول (۷) هر چه وزن پارامتر بیش تر باشد تأثیر آن بر شاخص کیفی بیش تر است؛ بنابراین TSS و سپس PO₄ با وزن های ۰/۱۱۲۸ و ۰/۱۰۹ بیش ترین تأثیرگذاری را دارند و همچنین As، Cd، Cr و Hg کمترین تأثیر را بر شاخص می گذارند. بزرگی وزن ها نشان دهنده پایداری کیفیت پساب برای پارامتر مورد نظر است؛ بنابراین کادمیوم با وزن ۰/۰۲۲۵

۱۴۵/۸ و ۹۱/۱۷ و در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ کاربری آب سطحی و تفرج می‌باشد و با توجه به این شاخص، بهترین کاربری در تمام سال‌ها مربوط به علوفه دام و چمنزار می‌باشد که کمترین مقدار این شاخص مربوط به سال ۱۳۹۴ با مقدار ۳۱/۶۱ می‌باشد.

همچنین با توجه به جدول (۸) و موارد هاشور خورده، می‌توان چنین استنباط کرد که سه نوع کاربری تهیه علوفه دام و چمنزار، آبیاری فضای سبز و صنعت در اکثر موارد یکی از گزینه‌های برتر از میان سایر گزینه‌ها می‌باشد و همچنین با مشاهده نمودار شکل (۷) که نشان‌دهنده میانگین مقادیر شش کاربری برای هر شاخص در هر سال می‌باشد، می‌توان روند پیشرفت و بهبود کیفیت پساب تصفیه‌خانه شهر اراک را در ۵ سال اخیر به‌وضوح مشاهده کرد. لذا از نمودار شکل (۷) می‌توان به این نتیجه رسید که شاخص FEQI نسبت به شاخص EEQI سخت‌گیرانه‌تر عمل کرده است، به‌طوری‌که بیش‌ترین اختلاف بین این دو منحنی ۳۲/۹ می‌باشد که همواره شاخص FEQI مقادیر بیش‌تری را نشان می‌دهد.

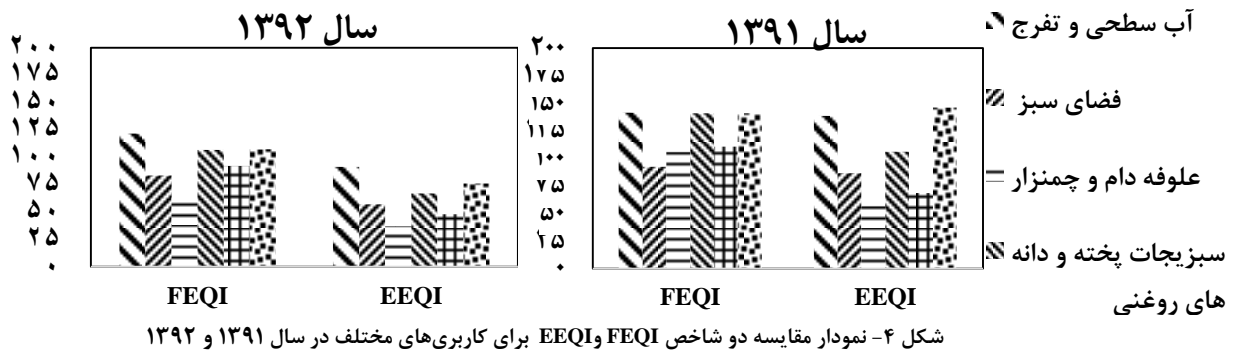
در سال ۱۳۹۱ با توجه به استانداردهای تهیه علوفه دام و چمنزار، پارامتر کلیفرم مدفوعی با تعداد ۱۶۰۰ در ۱۰۰ میلی‌گرم و همچنین فسفات با مقدار ۲۶ میلی‌گرم بر لیتر از استاندارد تعیین‌شده بیش‌تر می‌باشند که شاخص فازی با مقدار ۱۰۵/۹۳ استفاده از این کاربری را تأیید نمی‌کند. لذا مقدار شاخص آنتروپی ۵۶/۸۶ می‌باشد که اختلاف در مقادیر این دو شاخص نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر شاخص فازی است. در سال ۱۳۹۵ با توجه به استاندارد تهیه علوفه دام و چمنزار، تنها پارامتر کلیفرم مدفوعی از حد استاندارد خارج می‌باشد و مقادیر دو شاخص آنتروپی و فازی به ترتیب ۴۲/۱۳ و ۵۲/۰۷ است که علاوه بر تأیید استفاده پساب در این کاربری نشان‌دهنده بهبود وضعیت کیفیت پساب در طول دوره مطالعات و همچنین حساسیت شاخص‌ها به تغییرات پارامترها است.

(۴) تا (۷) و جدول (۸) آمده است. با در نظر گرفتن جدول (۳) و شکل (۳) که رده‌بندی دو شاخص را بیان می‌کند، در مقاله حاضر مقادیر شاخص بیش‌تر از ۱۰۰، محدوده غیرقابل مصرف پساب محسوب می‌شود. بر اساس نتایج سال ۱۳۹۱ از پساب تصفیه‌خانه اراک با توجه به شاخص فازی، پساب منطقه مورد مطالعه را فقط در زمینه آبیاری فضای سبز می‌توان استفاده کرد و همچنین در همین سال از خروجی‌های شاخص آنتروپی می‌توان نتیجه گرفت، پساب این تصفیه‌خانه در سه نوع کاربری فضای سبز، علوفه دام و صنعت قابل استفاده است. با توجه به نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های (۴) تا (۶)، برای شاخص FEQI در سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ سه نوع کاربری فضای سبز، علوفه دام و صنعت مورد تأیید قرار می‌گیرند و در سال ۱۳۹۳ این شاخص به‌جز کاربری آب سطحی و تفرج، بقیه کاربری‌ها را مورد تأیید قرار می‌دهد. با مشاهده جدول (۸)، کاربری آب سطحی و تفرج از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ همواره بیش‌ترین مقدار شاخص FEQI را در بین سایر کاربری‌ها داشته است؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار آن در این سال‌ها، ۱۲۱/۵۸ بوده است که به‌هیچ‌وجه این کاربری برای استفاده از پساب توصیه نمی‌شود. بهترین گزینه کاربری با توجه به شاخص FEQI در سال ۱۳۹۲ مربوط به کاربری علوفه دام و چمنزار با مقدار ۶۳/۲۲ و در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به ترتیب دو کاربری علوفه دام و چمنزار و صنعت با مقادیر ۵۲/۷۵ و ۵۲/۳۴ و در سال ۱۳۹۵ کاربری علوفه دام و چمنزار با مقدار ۵۲/۰۷ می‌باشند.

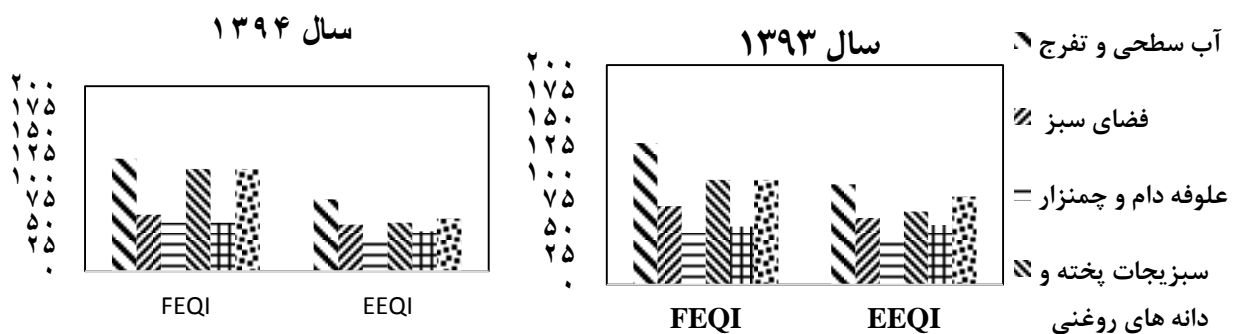
در سال ۱۳۹۱ با توجه به شاخص آنتروپی، کاربری علوفه دام با مقدار شاخص ۵۶/۸۷ به‌عنوان بهترین نوع کاربری معرفی می‌شود. این شاخص برای سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ نشان‌دهنده این است که تمام کاربری‌ها برای استفاده از پساب تصفیه‌خانه اراک مناسب می‌باشند. برای شاخص آنتروپی بیش‌ترین مقادیر در دو سال ۱۳۹۱ مربوط به کاربری تغذیه مصنوعی و در سال ۱۳۹۲ کاربری آب سطحی و تفرج به ترتیب با مقادیر شاخص

جدول ۸- نتایج شاخص‌های EEQI و FEQI برای پساب تصفیه‌خانه اراک در کاربری‌های مختلف برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵

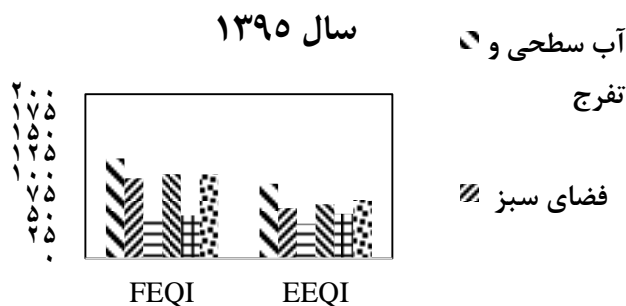
۱۳۹۵		۱۳۹۴		۱۳۹۳		۱۳۹۲		۱۳۹۱		نوع کاربری
FEQI	EEQI	FEQI	EEQI	FEQI	EEQI	FEQI	EEQI	FEQI	EEQI	
۱۲۱/۵۸	۹۰/۸۳	۱۲۱/۵۸	۷۷/۹۰	۱۲۹/۱	۹۱/۳۱	۱۲۱/۵۸	۹۱/۱۷	۱۴۱/۱۶	۱۳۸/۳	آب سطحی و تفرج
۹۷/۳۶	۶۱/۰۴	۶۱/۰۸	۵۰/۵۱	۷۱/۶۲	۶۰/۶۲	۸۳/۳۲	۵۷/۱۶	۹۲/۳۵	۸۶/۴۲	فضای سبز
۵۲/۰۷	۴۲/۱۳	۵۲/۳۴	۳۱/۶۱	۵۲/۷۵	۴۲/۲۷	۶۳/۲۲	۳۷/۱۰	۱۰۵/۹۳	۵۶/۸۷	علوفه دام و چمنزار
۱۰۲/۳۴	۶۵/۹۰	۱۱۰/۴۸	۵۲/۵۴	۹۵/۳۷	۶۶/۷	۱۰۶/۷۸	۶۶/۹۱	۱۴۰/۸۳	۱۰۵/۹۳	سبزیجات پخته و دانه‌های روغنی
۵۲/۳۴	۵۳/۹۷	۵۲/۳۴	۴۳/۰۴	۵۲/۷۵	۵۴/۲۲	۹۲/۱۴	۴۸/۱۵	۱۱۰/۵۹	۶۸/۳۴	صنعت
۱۰۲/۳۴	۷۱/۰۴	۱۱۰/۴۸	۵۷	۹۵/۳۷	۸۰/۲۸	۱۰۷/۴۳	۷۶/۰۱	۱۴۰/۸۳	۱۴۵/۸۱	تغذیه مصنوعی



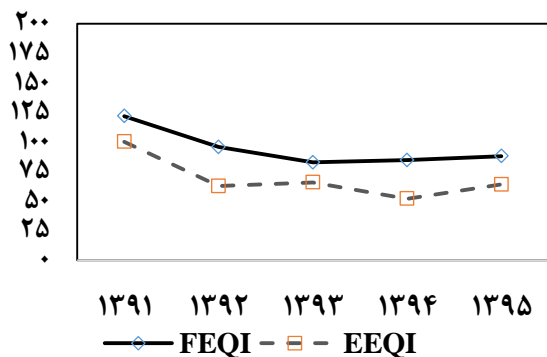
شکل ۴- نمودار مقایسه دو شاخص FEQI و EEQI برای کاربری‌های مختلف در سال ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲



شکل ۵- نمودار مقایسه دو شاخص FEQI و EEQI برای کاربری‌های مختلف در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴



شکل ۶- نمودار مقایسه دو شاخص FEQI و EEQI برای کاربری‌های مختلف در سال ۱۳۹۵



شکل ۷- نمودار مقایسه تغییرات دو شاخص FEQI و EEQI

همبستگی و مشخص کردن روابط پارامترها از روش تحلیل عاملی استفاده شد. سپس از نتایج این تحلیل سه عامل یا دسته پارامترها برای طراحی سامانه استنتاج فازی مشخص شد. عامل اول شامل پارامترهای pH، کلیفرم مدفوعی و TDS است و عامل دوم شامل BOD_5 ، NO_3 و PO_4 و عامل آخر، پارامترهای TSS، کلسیم و منیزیم را در خود گنجانده است. سه سیستم فازی بر مبنای این سه عامل و همچنین سه سیستم استنتاج فازی بر مبنای پارامترهای فلزات سنگین و تخم انگل با توجه به استانداردهای موجود برای هر پارامتر و همچنین هر شش نوع کاربری تعیین شد و سپس این شش سامانه، ورودی سامانه

نتیجه‌گیری

هدف از مقاله حاضر تدوین یک روش مناسب با رویکردی نوین برای انتخاب بهترین گزینه استفاده از پساب است. ارزیابی و امکان‌سنجی رویکرد پیشنهادی با استفاده از اطلاعات ماهانه پنج سال اخیر پساب تصفیه‌خانه شهر اراک برای استفاده در شش نوع کاربری پیشنهادی صنعت، فضای سبز، تهیه علوفه دام، سبزیجات پخته و تولید دانه‌های روغنی، آب سطحی و تفرجی و تغذیه مصنوعی انجام شد. دو شاخص کیفی فازی و آنتروپی وزن‌دار با لحاظ استانداردهای مختلف تعریف و بکار گرفته شد. ابتدا برای تحلیل داده‌ها به‌منظور تعیین نوع

در شرایط خاص استفاده از هر کدام را ممکن می‌کند. همچنین شاخص آنتروپی دارای محاسبات نسبتاً ساده‌ای می‌باشد و همان‌طور مشاهده شد دارای نتایج منطقی و تغییراتی مشابه با شاخص فازی است که استفاده از آن را برای تصمیم‌گیری ممکن می‌کند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه تهران و شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی - اراک به خاطر تأمین امکانات و داده‌های لازم برای انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

REFERENCES

- Amiri, V. Rezaei, M. and Sohrabi, N, (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environ Earth Sci.* (2014) 72,3479-3490.
- Dahiya, S.B. Singh, S. Gaur, V. Garg, K. and Kushwaha, H.S. (2007). Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. *Journal of Hazardous Material.* 147(3), 946-938.
- Environmental Criteria of Treated WasteWater and Return Flow Reuse, No. 535, Ministry of Energy EPA. National Recommended Water Quality Criteria, (2006).
- Fang Fang, Li-Li Qiao. Bing-Jie Ni, Jia-Shun Cao and Han-Qing Yu. (2017). Quantitative evaluation on the characteristics of activated sludge granules and flocs using a fuzzy entropy-based approach. *Scientific Reports.* 7,42910.
- FAO/UNESCO. (1973). Irrigation, Drainage, and Salinity. An International Sourcebook.
- Gharibi H. Mahvi A.H. Nabizadeh R. Arabalibeik H. Yunesian M. and Sowlat, M.H. (2012). A novel approach in water quality assessment based on fuzzy logic. *Journal of environmental management*, 112, 87-95.
- Guey-Shin, Sh. Bai-You, Ch. Chi-Ting, Ch., Pei-Hsuan, Y, and Tsun-Kuo, Ch, (2011). Applying Factor Analysis Combined with Kriging and Information Entropy Theory for Mapping and Evaluating the Stability of Groundwater Quality Variation in Taiwan Int. J. Environ. Res. Public Health. (8), 1084-1109.
- Hosseini-Moghari, S M H. 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. *Environ Earth Sci.*
- Icaga Y. (2007). Fuzzy evaluation of water quality classification. *Ecological Indicators*, 7(3), 710-718.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Drinking water Physical and chemical specifications, ICS:13.060.20.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Specifications of industrial effluents, ISIRI NUMBER 2439.
- Jian-Hua, W. Pei-Yue, L. and Hui, Q. (2011). Groundwater Quality in Jingyuan County, a Semi-Humid Area in Northwest China. *E-Journal of Chemistry.* 8(2),787-793.
- Kawachi, T. Maruyama, T. and Singh, V.P. (2001). Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan, *J. Hydrol.* (246), 36-44.
- Machine Studies*, 8(6), 669-678.
- Mamdani E.H. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man.*
- Mohammadi Ghaleni, M. and Ebrahimi, K. (2015). Effects of human activities and climate variability on water resources in the Saveh plain, Iran. *Environ Monit Assess.* 187:35, DOI 10.1007/s10661-014-4243-2
- Nasseri, M, Tajrishy, M. Nikoo, M R. and Zaherpour, J. (2013). Recognition and Spatial Mapping of Multivariate Groundwater Quality Index using Combined Fuzzy Method, *Journal of Water & Wastewater*, Issue 85 (in Farsi)
- Niko, M. and Karachian, R. (2010). Water quality evaluation of rivers using hybrid fuzzy inference system and bayesian networks- Jajrood River. *The 4th Environmental Engineering Expert Conference.*
- Ozkul, S. Harmancioglu, N.B. and Singh, V.P. (2000). "Entropy-based assessment of water quality monitoring networks". *J. Hydrol. Eng.* (5), 90-100.
- Pei-Yue, L. Hui, Q. and Jian-Hua, W. (2010). Groundwater Quality Assessment Based on Improved Water Quality Index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *E-Journal of Chemistry.* 7(S1): S209-S216.
- Sadat Noori, S.M., Ebrahimi, K. and Liaghat A.M., (2013). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environ Earth Sci.* DOI 10.1007/s12665-013-2770-8.

استنتاج فازی هفتم و هشتم قرار گرفت که پس از غیرفازی‌سازی، نتایج آن، شاخص FEQI را تعیین کرد. در ادامه برای استفاده از شاخص EEQI، وزن‌های هر پارامتر با روش آنتروپی تعیین شد و با توجه به استانداردهای هر نوع کاربری نتایج این شاخص برای هر کاربری به‌دست آمد. شاخص فازی نسبت به شاخص آنتروپی سخت‌گیرانه‌تر عمل کرد، اما مشاهده شد که هر دو شاخص در اکثر موارد روند تغییرات مشابهی را ارائه می‌دهند. هر دو شاخص دارای مزیت‌هایی هستند که به‌عنوان مثال می‌توان به عدم قطعیت‌گرایی شاخص فازی و حذف قضاوت‌های کارشناسی از شاخص آنتروپی اشاره کرد که

- Sadat Noori, S.M., Ebrahimi, K., Liaghat A.M. and Hoorfar, A.H., (2012). Comparison of different geostatistical methods to estimate groundwater level at different climatic periods. *Water and Environment Journal*. DOI:10.1111/j.1747-6593.2012.00321.x.
- Shannon, CE. (1948), "A mathematical theory of communications, *I and II*," *Bell Sys. Technol. J.* 27, 379-423.
- Sugeno M. (1985). Industrial applications of fuzzy control. *Elsevier Science Inc.*
- Verlicchi, P. Masotti, L. and Gallett, A. (2010), Wastewater polishing index: a tool for a rapid quality assessment of reclaimed wastewater, *Environ Monit Assess* (2011) 173, 267–277.
- WHO. (2004). Guidelines for drinking water quality: training pack. WHO, Geneva, Switzerland.
- Yager R.R. and Filev D.P. (1994). Essentials of fuzzy modeling and control. *John Wiley and Sons*, New York.
- Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.