

## طراحی شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از منطق فازی

قاسم حسنی<sup>۱</sup>، امیرحسین محوی<sup>۲\*</sup>، سیمین ناصری<sup>۳</sup>، حسین عرب علی بیک<sup>۴</sup>، مسعود یونسیان<sup>۵</sup>، حامد قریبی<sup>۱</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۲. استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران ۳. استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۴. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و علوم در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۵. دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی تهران

\* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۲۱۸۸۹۵۴۹۱۴ - فکس: ۰۲۱۶۶۴۶۲۲۶۷ - ایمیل: Ahmahvi89@yahoo.com

### چکیده

**زمینه و هدف:** یکی از مهمترین منابع آب‌های مصرفی در دنیا، آب‌های زیرزمینی می‌باشد. یکی از راه‌های جامع و متداول برای ارزیابی کیفیت آب، استفاده از اندیس‌های کیفی است. منطق فازی به‌عنوان یک روش مناسب از هوش مصنوعی جهت توسعه سیستم‌های پیچیده و نامشخص مانند اندیس‌های محیط زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مطالعه ارائه یک شاخص جامع کیفی برای آب‌های زیرزمینی بر پایه‌ی منطق فازی براساس خصوصیات مختلف کیفی آب می‌باشد.

**روش کار:** در این مطالعه از ۲۴ پارامتر مختلف فیزیکوشیمیایی آب براساس تأثیرات آن بر روی کیفیت آب و همچنین مصرف کننده استفاده شده است. طراحی شاخص کیفی براساس سیستم استنتاج فازی و به روش ممدانی صورت گرفته است. بعد از طراحی، شاخص به وسیله‌ی داده‌های حاصل از آب قنات‌های یزد مورد ارزیابی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** شاخص کیفی ارائه شده در این مطالعه نسبت به شاخص NSF که از ۹ پارامتر برای بیان کیفیت آب استفاده می‌کند، دارای نتایج سختگیرانه‌تری است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تفاوت در تعداد پارامترها و رابطه‌ی درونی پارامترها بر یکدیگر باشد. در ارزیابی شاخص ارائه شده با داده‌های حاصل از قنات‌های یزد، خروجی سیستم کیفیت پایین آب را نشان می‌دهد که پایین‌تر از استاندارد لازم برای مصارف آشامیدنی می‌باشد.

**نتیجه گیری:** با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که شاخص کیفی آب پیشنهاد شده توسط این مطالعه می‌تواند به عنوان ابزار جامعی برای نشان دادن کیفیت واقعی آب به ویژه در زمانی که با اهداف مصارف انسانی همراه باشد، مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** کیفیت آب، استنتاج فازی، قنات‌های یزد، اندیس محیط زیستی

دریافت: ۹۰/۷/۲۴

پذیرش: ۹۰/۱۰/۵

### مقدمه

بسیاری از سیستم‌های تصفیه آب در همه کشورهای جهان جهت تامین نیازهای آبی جوامع به منابع آبی زیرزمینی وابسته است. بطور مثال در تهران با جمعیتی بالغ بر ۹ میلیون نفر، بیش از نیمی از آب مصرفی اجتماع شهری از منابع آب زیرزمینی تامین

می‌شود. با این وجود در سال‌های اخیر این منابع در اثر زائادات صنعتی، زائادات انسانی، ترکیب طبیعی خاک، زهکش‌های کشاورزی، خروجی سپتیک‌تانک‌ها، رواناب‌های سطحی و کاربرد کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها، به محیطی آلوده تبدیل شده‌اند [۱-۳]. به عنوان مثال، نیترات، فسفر و آلودگی‌های ناشی از کاربرد آفت‌کش‌ها یکی از مهمترین نگرانی‌های

می‌باشد [۷]. در حال حاضر هوش مصنوعی<sup>۱</sup> (AI) به عنوان یک روش قابل اعتماد برای تبدیل هوش انسانی به داده‌های قابل فهم برای کامپیوترها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. منطق فازی که توسط لطفی‌زاده (۱۹۶۵) معرفی شد، بعنوان یک روش مناسب از هوش مصنوعی جهت توسعه سیستم‌های پیچیده و نامشخص مانند اندیس‌های محیط زیستی مورد استفاده قرار گرفت [۸]. این سیستم بسیاری از شاخص‌های واقعی را در مقابل آن‌هایی که از منطق عددی استفاده می‌کردند، توسعه داد. منطق فازی سعی بر این دارد که اندیس‌ها را به گونه‌ای بسط دهد که به تفکر انسان نزدیکتر باشد، و بنابراین می‌توان با استفاده از اطلاعات فازی از خطاها، ابهامات و مشکلات جلوگیری کرد [۹]. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری بر روی موضوعات محیط زیستی مانند کیفیت هوا [۱۰]، کیفیت آب‌های سطحی [۱۱، ۱۲] و بررسی کیفی آب برای اهداف کشاورزی [۱۳]، با استفاده از منطق فازی انجام گرفته است. محمد اوغلو<sup>۲</sup> و همکاران نیز در مطالعه‌ای به بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی و ارائه شاخص آلودگی با استفاده از منطق فازی پرداخته‌اند که تعداد پارامترهای استفاده شده در این مطالعه محدود بوده و از بسیاری از پارامترهای کیفی آب صرف‌نظر شده است [۴]. و همچنین داهیا<sup>۳</sup> و همکاران نیز در مطالعه‌ای به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی پرداخته و از ۱۰ پارامتر کیفی آب برای ارائه شاخص مورد نظر استفاده کرده‌اند. در این مطالعه پارامتر سختی در کنار غلظت کلسیم و منیزیم مورد استفاده قرار گرفته است، در حالی که سختی بیان‌کننده‌ی غلظت کلسیم و منیزیم موجود در آب می‌باشد [۷]. در دو مطالعه ذکر شده به علت محدود بودن تعداد پارامترهای کیفی استفاده شده، از تاثیر پارامترهای کیفی زیادی بر روی ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی صرف‌نظر شده است (مانند آفت‌کش‌ها و

جوامع اروپایی در دهه‌ی ۱۹۷۰ بوده است، نیترا و آفت‌کش‌ها در آمریکا نیز از مهمترین مواد آلوده‌کننده منابع آبی زیرزمینی بوده است [۴]. در سال‌های اخیر نیز آلودگی‌های ناشی از کاربرد مواد گوناگون در کشاورزی به علت افزایش استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی و دامداری در مناطق مختلف مانند هلند باعث تشدید آلودگی آب‌های زیرزمینی شده است [۵]. با توجه به موارد ذکر شده نیاز است که یک پایش و ارزیابی ممتد و جامعی از آب‌های زیرزمینی جهت مصارف شرب انسانی صورت گیرد. یکی از راه‌های جامع و متداول برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی، استفاده از اندیس‌های کیفی است که می‌تواند بعنوان پلی بین متخصصین و جوامع انسانی که داده‌های جمع‌آوری شده را مدیریت می‌کنند (مانند مدیران و تصمیم‌گیرانی که دارای تخصص مربوطه هستند) مورد استفاده قرار گیرد [۶]. روش‌هایی که برای ارزیابی کیفی آب‌ها به وسیله اندیس‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل آنالیزهای چندمتغیره [۶]، به همراه آنالیز فضایی چندمتغیره می‌باشد. با این وجود این اندیس‌ها به علت نتایج خروجی ناقص، دارای خطاهایی در کاربرد به عنوان تنها روش ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی هستند. این نواقص می‌تواند به این واقعیت که ارزیابی و پایش کیفیت آب‌ها دارای ابهامات زیادی از مرحله نمونه‌گیری تا تجزیه و تحلیل می‌باشند، نسبت داده شود [۷]. پارامتر مهم دیگر بعد از انتخاب پارامترها در روش‌های تجربی، استاندارد کردن پارامترهای انتخابی است، که این کار سلیقه‌ای است که می‌تواند با خطاهای داده‌ای همراه باشد و در نتیجه باعث ایجاد محدودیت در کاربرد شود [۶]. و در نهایت محدود بودن تعداد پارامترهای انتخابی ذکر شده می‌تواند بر روی کاربرد اندیس‌ها تاثیر بسزایی داشته باشد. از این‌رو، با توجه به موارد ذکر شده به نظر می‌رسد وجود یک سیستم جدید برای طبقه‌بندی داده‌های مهم کیفی آب ضروری

1. Artificial intelligence  
2. Muhammetoglu  
3. Dahiya

پارامترها و همچنین فرایند تصمیم‌گیری موجود در سیستم را درک کند. منطق فازی سعی می‌کند تا سیستم‌های باز را به گونه‌ای که به درک انسان نزدیک باشد توسعه دهد، بنابراین به دانش متخصص بعنوان یک بخش مهم از سیستم نیاز دارد. بر همین اساس در مطالعه‌ی حاضر، هدف اصلی استفاده از منطق فازی به عنوان ابزاری برای طراحی و توسعه یک اندیس کیفیت آب با استفاده از دانش متخصص و اجرا در یک جعبه سفید می‌باشد. در مطالعه حاضر، داده‌های جمع‌آوری شده مرتبط با پارامترهای کیفی آب در جعبه منطق فازی پردازش می‌شوند تا خروجی‌های موردنظر بدست آید، برای این کار نیاز به شناخت کامل اصول اساسی که در جعبه سفید ذکر شده مانند تابع‌های عضویت، عملگرهای مجموعه فازی و قوانین استنتاج فازی می‌باشد که در زیر بطور خلاصه توضیح داده شده‌اند.

**توابع عضویت:** هر ورودی مانند یک مجموعه فازی در سیستم استنتاج فازی، یک حوزه را پوشش می‌دهد که «جهان مباحثه» نامیده می‌شود. یک تابع عضویت در درجه‌ای بین صفر تا یک برای هر یک از اجزای «جهان مباحثه» تعیین شده است. در منطق کلاسیک، درجه عضویت برای همه اجزا در گروه یک قرار دارد و تمام اجزا ارزش مشابهی برای سیستم دارد. شکل ۱، یک مثال از تابع عضویت در دو روش منطق فازی و منطق کلاسیک را نشان می‌دهد.

$x_1$  یک عضو مجموعه‌ی فازی A است که در شکل ۱ نشان داده شده که به X جهان مباحثه وابسته است و همچنین به مجموعه‌ی A از طریق تابع عضویت  $\mu_A(x)$  که بین صفر تا یک است، وابستگی دارد. تمام اجزای یک مجموعه‌ی فازی، برخلاف گروه‌های منطق کلاسیک، ارزش یکسانی برای عضویت در گروه‌های فازی A ندارد. مجموعه‌ی فازی در معادله زیر نشان داده شده است:

$$A = \{(x_1, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad 0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad (1)$$

فلزات سنگین) که باعث تخمین نادرست آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود و این موضوع نشان‌دهنده این است که به یک شاخص جامع برای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی نیاز می‌باشد. بنابر دلایل ذکر شده، هدف اصلی این مطالعه ارائه یک شاخص جامع بر پایه منطق فازی با توجه کامل به خصوصیات فیزیکوشیمیایی (مانند DO, BOD, pH, TH و غیره) و سموم (مانند فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها) براساس تاثیر آن‌ها بر روی کیفیت آب و سلامت انسان‌ها، برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد شاخص ارائه شده، یک مطالعه موردی بر روی کیفیت آب چهار محل نمونه‌برداری از قنات‌های یزد (به عنوان یک منبع مهم آب زیرزمینی در ایران) انجام گرفته است.

## روش کار

**منطق فازی:** منطق فازی، که توسط لطفی‌زاده (۱۹۶۵) معرفی شد، بعنوان یک روش مناسب برای توسعه سیستم‌های پیچیده و مبهم بکار رفته است [۸]. این روش، بیشتر از روش‌های عددی، قابلیت ارتباط برقرار کردن بین اجزای کیفی و اجزای کمی یک سیستم را دارا می‌باشد، بنابراین سیستم‌های ساخته شده با این روش واقعی‌تر از سیستم‌های عددی می‌باشند. یکی از مهمترین کاربردهای منطق فازی، مواجهه با مشکلات زیست‌محیطی است که وابستگی درونی پیچیده‌ای بین پارامترهای آن برقرار است و به دانش متخصص بعنوان یک بخش کیفی برای پوشش قسمت‌های مبهم نیاز دارد. در دیگر روش‌ها، تمام بخش‌های قوانین تعریف شده و رابطه بین پارامترها و همچنین نتایج خروجی در یک جعبه سیاه قرار دارد و کاربر نمی‌تواند بفهمد که در جعبه چه اتفاقی می‌افتد. برخلاف این‌گونه سیستم‌ها، برنامه‌های توسعه‌داده شده براساس منطق فازی در یک جعبه سفید انجام می‌شوند و کاربر این توانایی را دارد که به آسانی قوانین تعریف شده و رابطه بین

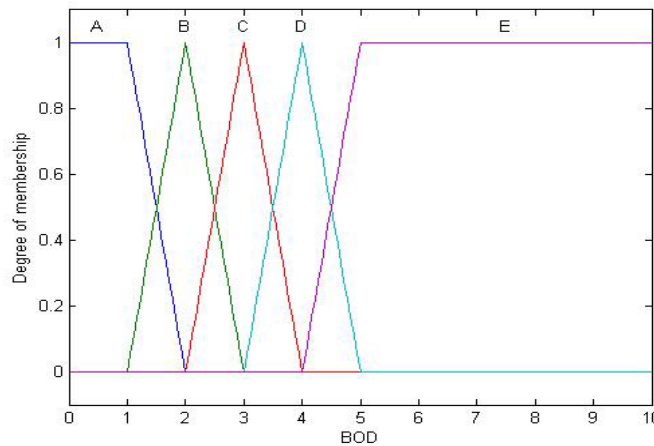
1. Membership function  
2. Universe of discourse

استفاده شده است. بر همین اساس، جهت رسیدن به هدف اصلی این مطالعه، از روش سیستم استنتاج فازی به همراه دانش متخصصین استفاده شده است. برای پارمترهای مورد استفاده در مطالعه بصورت جداگانه توابع عضویت ترسیم شده است که در شکل ۲ تابع عضویت طراحی شده برای BOD نشان داده شده است.

یک تابع عضویت در مجموعه فازی ممکن است شکل‌های مختلفی مانند ذوزنقه‌ای، مثلثی، گوسی و غیره داشته باشد. یک مثال از تابع عضویت مثلثی در شکل ۱ (a) نشان داده شده است. روش‌های متفاوتی برای ایجاد تابع عضویت از قبیل شبکه‌های عصبی [۱۴-۱۶]، الگوریتم ژنتیک [۱۷، ۱۸]، دانش متخصصین [۱۹، ۲۰] و مجموعه‌های فازی [۱۴، ۱۵، ۲۱-۲۳]



شکل ۱. توابع عضویت در روش کلاسیک (a) و منطق فازی (b)



شکل ۲. تابع عضویت طراحی شده برای BOD

عامل اشتراک (AND) که در معادله ۲ نشان داده شده، یک گروه جدید به وسیله اشتراک مجموعه فازی A و B ایجاد می‌کند. معادله زیر تعریف عامل اشتراک را نشان می‌دهد:

$$\text{AND: } \mu_{A \cap B} = \mu_A \cap \mu_B = \min(\mu_A, \mu_B) \quad (2)$$

نوع دیگری از عملگرهای فازی، اجتماع (OR) است که یک گروه جدید به وسیله اجتماع مجموعه فازی A و B ایجاد می‌کند، که در معادله ۳ نشان داده شده است. معادله زیر عامل اجتماع را توضیح می‌دهد:

$$\text{OR: } \mu_{A \cup B} = \mu_A \cup \mu_B = \max(\mu_A, \mu_B(x)) \quad (3)$$

**عملیات‌های مجموعه فازی:** عملگرهای مجموعه فازی برای تعریف کردن ارتباط بین عوامل در مجموعه فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملگرهای مجموعه فازی، در طول فرایند، یک گروه جدید ایجاد می‌کنند که بسته به نوع عملگر مورد استفاده، متفاوت می‌باشد. عملگرهای فازی مانند اشتراک (AND)، اجتماع (OR) و نفی (NOT) در طی سیستم‌های مبتنی بر اساس منطق فازی کاربرد زیادی دارند [۱۸، ۲۴].

تعریف می‌شود. یکی از راه‌های طراحی توابع عضویت استفاده از نظر متخصصین می‌باشد. لازم به ذکر است یک فرد متخصص علاوه بر دانستن منطق فازی باید به موضوع مورد بحث که کیفیت آب می‌باشد، اشراف داشته باشد. در مطالعه‌ی حاضر، توابع مثلثی و ذوزنقه‌ای برای توصیف گروه‌های موجود استفاده شده است، از میان توابع گوناگون، در مطالعات مرتبط با مسائل زیست‌محیطی بر مبنای سیستم فازی، این دو نوع تابع بیشترین کاربرد را دارا می‌باشند. در طراحی سیستم‌های فازی نیاز است که هر تابع با نامی مشخص شود که در این مطالعه از نام‌های: خیلی کم<sup>۲</sup> (VL)، کم<sup>۳</sup> (L)، متوسط<sup>۴</sup> (M)، زیاد<sup>۵</sup> (H) و خیلی زیاد<sup>۶</sup> (VH) برای نشان دادن مجموعه فازی هر پارامتر استفاده شده است. برطبق اطلاعات موجود در جدول ۱ توابع عضویت بر مبنای معادله زیر ایجاد و بسط داده می‌شود.

$$Triangular : f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \text{ or } c < x \\ \frac{(a-x)}{(a-b)} & a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (5)$$

$$Trapezoidal : f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \text{ or } d < x \\ \frac{(a-x)}{(a-b)} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (6)$$

با توجه به اینکه پارامترهای کیفی آب بر روی یکدیگر و همچنین بر روی کیفیت نهایی آب تأثیرگذار هستند، از عملگرهای AND، OR و NOT استفاده

عملگر نفی (NOT) در مجموعه‌های فازی A و B در معادله‌ی ۸ نشان داده شده است، و بصورت زیر توصیف می‌شود:

$$NOT: \mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (4)$$

کاملترین تعریف درباره‌ی عملگرهای مجموعه فازی می‌تواند در (Ross, 2004, Yager and Filev, 1994) یافت شود [۲۵، ۲۶].

**قوانین استنتاج فازی:** یک قانون استنتاج فازی نشان‌دهنده ارتباط بین مجموعه‌های ورودی و خروجی است. قواعد استنتاج تعریف شده در جعبه‌ی سفید نشان می‌دهد که چگونه هر زیرمجموعه ورودی با زیرمجموعه خروجی ارتباط دارد. فرایند با استفاده از قوانین اگر-آنگاه<sup>۱</sup> انجام می‌شود که شامل دو بخش است، بخش اولیه یا اگر و بخش بعدی یا آنگاه. قوانین اگر-آنگاه بصورت زیر تعریف می‌شود:

- اگر A، a باشد، آنگاه C، c می‌باشد.

- اگر B، b باشد، آنگاه C، c می‌باشد.

که در آن a، b و c نام‌های لغوی زیرمجموعه‌های تعریف‌شده در مجموعه‌های A، B و C می‌باشند [۲۴]. به علاوه عملگرهای (AND) یا (OR) در ادامه ممکن است شامل چند بخش شود که در مثال زیر نشان داده شده است:

- اگر A، a باشد و D، d باشد، آنگاه C، c است.

تعریف کامل‌تر را می‌توان در (Ross, 2004) پیدا کرد [۲۵].

**طراحی شاخص کیفی برای آب‌های زیرزمینی بر مبنای سیستم استنتاج فازی:** این مطالعه از نوع کاربردی جهت ارائه روشی برای سنجش کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. بیست و چهار پارامتر برای طراحی شاخص کیفی موردنظر در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. دلایل انتخاب پارامترهای مذکور در بخش «بحث» آورده شده است. در ابتدا براساس نظر متخصصین توابع عضویت برای هر پارامتر

1. if-then

2. very low  
3. Low  
4. Moderate  
5. High  
6. Very high

پارامتر فازی نرمالیزه شده باقیمانده، نشان‌دهنده کیفیت آب‌های زیرزمینی است. نوشتن تمام قانون‌ها در اینجا ممکن نیست، اما تعدادی از آن‌ها در زیر نشان داده شده است.

*If Hg is VL and Ba is VL then Gr6 is VH*  
*If Gr1 is VL and Gr2 is L Gr11 is VL*  
*If Gr3 is L and Gr4 is L then Gr12 is L*  
*If Gr16 is VH Gr17 is VH then WQI is VH*

در مجموع ۵۷۵ قانون برای شاخص موردنظر بیان شده است، متخصصانی که هم منطق فازی و هم اثرات کیفیت آب را می‌شناسند، باید قانون‌ها را تعریف نمایند. اختصاص فاکتور وزنی «یک» به هر پارامتر اجازه می‌دهد تا در گروه‌های مشخص، دسته‌بندی شوند. جهت تطبیق بیشتر شاخص ارائه‌شده با نظر متخصصین، از سیستم استنتاج ممدانی استفاده شده است [۲۴]. سیستم‌های ممدانی برخلاف سیستم‌های تاکی-سوگنو نیاز دارند که جواب نهایی آن‌ها از فازی به غیر فازی تبدیل شود، از این‌رو سیستم‌های مختلفی جهت این امر استفاده می‌شوند که می‌توان به COG<sup>۲</sup> اشاره نمود. از میان روش‌های مختلف، روش COG استفاده بیشتری در مطالعات زیست‌محیطی دارد، به همین دلیل در این مطالعه نیز برای غیرفازی کردن<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار گرفته است.

$$Z = \frac{\int \mu(z)zdz}{\int \mu(z)dz} \quad (7)$$

تمام محاسبات مربوط به مطالعه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود.

**مطالعه موردی:** پس از اینکه شاخص آماده شد، تحت شرایط واقعی با استفاده از داده‌های حاصل از سنجش پارامترهای کیفی در آب قنات‌های یزد، بعنوان بخشی از آب‌های زیرزمینی، ارزیابی آن صورت می‌گیرد. داده‌های موجود از شرکت قطراب دریافت شده است. استان یزد بین عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و طول

می‌شود. در این مطالعه، با توجه به تاثیر همزمان پارامترها بر روی کیفیت آب و حضور اغلب آن‌ها در منابع آبی، از عملگر AND بیشتر استفاده شده است. گام بعدی برای بیان قانون‌ها، قانون اگر-آنگاه می‌باشد. باتوجه به یکی از فواید سیستم‌های استنتاج فازی در طراحی سیستم‌های پیچیده، مشخص است که در اغلب این سیستم‌ها تعداد پارامترهای موجود بالاتر از حد معمول و همچنین سیستم‌های سنتی می‌باشد. باتوجه به حجم بالای تعداد پارامترها، نیاز به استفاده از یک سیستم مناسب فازی می‌باشد، زیرا تعداد پارامترها تاثیر مستقیم بر روی تعداد قانون‌ها داشته و تعداد بالای آن‌ها سبب بروز خطا در طراحی سیستم می‌شود. در این مطالعه از روش نوین استاندارد کردن پارامترها به وسیله سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشخص شده است، در ابتدا پارامترها نرمالیزه شده (بین صفر تا صد) و پس از آن به گروه‌های ۱ تا ۱۲ تبدیل می‌شوند. در این لایه از سیستم نیز گروه‌ها نرمالیزه شده و تا رسیدن به نتیجه به همین صورت ادامه می‌یابد. در این سیستم از روش وزن‌دهی عددی استفاده نشده است و به هر پارامتر با ارزش یکسان در ابتدا رفتار شده است (وزن=۱)، این عمل به متخصصین اجازه می‌دهد تا ارزش هر پارامتر را در قانون‌های موجود در بدنه سیستم لحاظ کند. لازم به ذکر است که سیستم استنتاج ممدانی که قابلیت بیشتری نسبت به دیگر سیستم‌ها در استفاده از تجربیات و نظرات متخصصین در بدنه سیستم دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ نشان‌دهنده مبنای فازی الگوریتم شاخص کیفی آب زیرزمینی است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، سیستم شامل ۲۲ قانون استنتاج فازی و چهار مرحله است که ورودی‌ها را براساس نمره‌دهی بین صفر تا صد نرمالیزه می‌کند. دوک<sup>۱</sup> از روش مشابهی برای ایجاد شاخص کیفی فازی برای آب‌های سطحی استفاده کرده است [۱۲]. در مرحله بعد، سه

2. Center of gravity (COG)  
 3. Defuzzificatin

1. Duque

صورت گرفته است، کیفیت نشان داده شده توسط این سیستم پایین‌تر از نتایج خروجی از NSF می‌باشد. اختلاف نتایج شاخص ارائه‌شده با نتایج خروجی از NSF می‌تواند به دلایل مختلفی مانند بالاتر بودن تعداد پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه نسبت به پارامترهای مورد استفاده شاخص NSF باشد. تفاوت‌های موجود به علت تاثیرگذاری پارامترها بر نوع آب موردنظر نیز می‌باشد. بعنوان مثال فلزات سنگین از آلاینده‌های خاصی می‌باشند که بعلاوه اثرات منفی، در سال‌های اخیر توجه زیادی به آن‌ها شده است و این پارامترها در شاخص NSF مورد استفاده قرار نگرفته است، ولی در شاخص ارائه‌شده در این مطالعه از باریوم، کادمیوم، سرب و جیوه بعنوان معمول‌ترین نوع فلزات سنگین در طراحی شاخص کیفی استفاده شده است. همچنین اکسیژن محلول پارامتر تاثیرگذاری بر روی کیفیت آب‌های زیرزمینی نمی‌باشد، زیرا آب در حین عبور از لایه‌های خاک در شرایط بی‌هوازی قرار می‌گیرد و طبیعی است که دارای اکسیژن محلول بالایی نباشد، در حالی که در آب‌های سطحی که توسط شاخص NSF تعیین کیفیت می‌شوند، پارامتری تاثیرگذار است. در مطالعه‌ای که توسط دوک<sup>۲</sup> بر روی آب‌های سطحی صورت گرفته است، میزان کیفیت ارائه‌شده توسط اندیس فازی طراحی‌شده، پایین‌تر از کیفیت نشان داده شده توسط سیستم NSF می‌باشد [۱۲]، که نتایج به دست‌آمده از این مطالعه نیز با نتایج حاصل از مطالعه دوک همخوانی دارد. داده‌های جمع‌آوری‌شده برای پارامترهای کیفی در چهار ایستگاه نمونه‌برداری موردنظر نشان می‌دهد که وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی در ناحیه مذکور پایین‌تر از استاندارد می‌باشد. غلظت فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها در دوره مطالعه‌شده بسیار بالا بوده و غلظت دیگر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی پایین‌تر از استاندارد می‌باشد. وضعیت فعلی قنات‌های یزد احتمالاً تحت تاثیر نشت فاضلاب‌های شهری و صنعتی

جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی از نصف النهار مبدا قرار گرفته است. بعلاوه قرار گرفتن در حاشیه کویر، این استان دارای میزان بارندگی کمی می‌باشد و آب نواحی روستایی و بخشی از مصرف شهری با استفاده از قنات‌ها تامین می‌شود، بنابراین سنجش کیفیت آب چهار محل از مجموعه قنات‌های این منطقه بعنوان بخشی از آب‌های زیرزمینی، با استفاده از شاخص ارائه‌شده، انجام گرفت.

### یافته‌ها

به منظور ارزیابی شاخص ارائه‌شده، نیاز به آزمایش آن در شرایط واقعی می‌باشد. بنابراین داده‌های حاصل از سنجش کیفیت چهار محل نمونه‌برداری از قنات‌های یزد در طی سال‌های ۸۶ تا ۸۹ که توسط شرکت قطر آب انجام شده است، مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۴ (الف-د) نتایج سنجش خصوصیات کیفی آب قنات‌ها بعنوان نمونه‌ای از آب‌های زیرزمینی نشان را می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌های پایین دیده می‌شود، داده‌های حاصل از سنجش پارامترهای مختلف در نمونه‌های اندازه‌گیری شده پایین‌تر از استاندارد آب آشامیدنی می‌باشد. اگرچه اغلب تفاوت‌هایی وجود دارد، ولی سطح کیفی این آب‌ها نشان‌دهنده نامناسب بودن آن برای مصارف شرب می‌باشد. نتایج حاصل از سنجش کیفیت آب محل‌های نمونه‌برداری ذکر شده در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ و مقایسه نتایج کیفی بدست آمده از شاخص طراحی‌شده در بازه زمانی سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ با شاخص کیفی ارائه شده توسط NSF در شکل ۴ (الف-د) نشان داده شده است.

### بحث

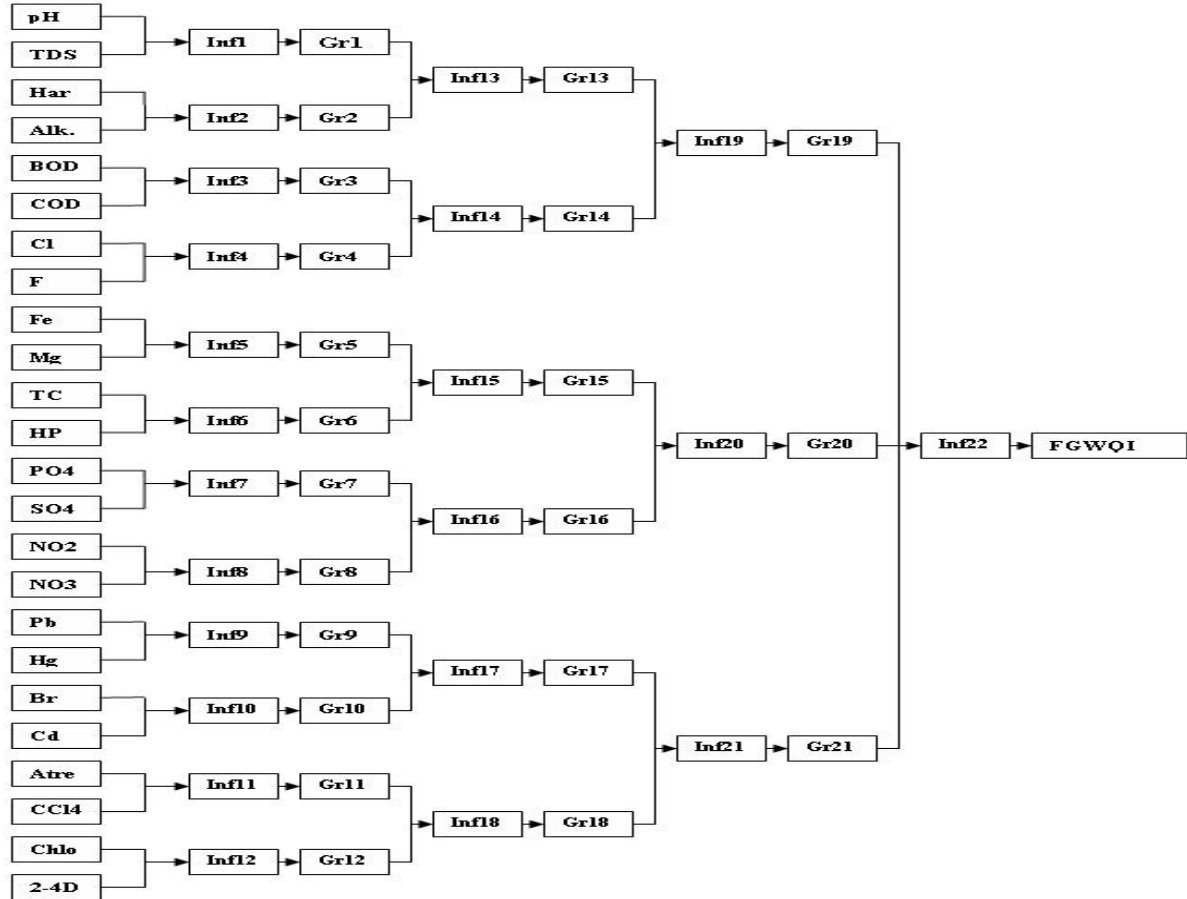
ارزیابی شاخص ارائه شده: طبق مقایسه‌ای که بین سیستم طراحی‌شده در این مطالعه و شاخص NSF<sup>۱</sup>

2. Duque

1. National Sanitation Foundation Water Quality Index

مسیر طولانی احتمال آلوده شدن و پایین آمدن کیفیت آب را افزایش می‌دهد. براساس نتایج حاصل از شاخص کیفی ذکرشده براساس منطق فازی، کیفیت آب قنات‌ها ممکن است تحت تاثیر نفوذ آلاینده‌های سطحی قرار گرفته باشد.

و نبود برنامه‌های پایش مناسب به وجود آمده است. قنات شامل مجموعه‌ای از چاه‌ها می‌باشد که آب را از یک منطقه خاص به محل مصرف هدایت می‌کند و در شهری مانند یزد که در ناحیه کویری قرار گرفته است، به تعداد زیاد دیده می‌شود. برهمین اساس، آب ممکن است صدها کیلومتر را طی کند که این



شکل ۳. الگوریتم طراحی شده برای شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی

قارچ‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها در محیط زیست افزایش یافته است و سلامت انسان‌ها را در معرض خطر قرار داده است [۲۷-۲۹]. پارامترهای استفاده‌شده در پنج گروه دسته‌بندی می‌شوند، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها (شامل آترازین، کلردان، CCl<sub>4</sub> و 2-4-D)، فلزات سنگین (شامل باریوم، کادمیوم، سرب و جیوه)، پارامترهای فیزیکوشیمیایی (شامل BOD، COD، pH، TDS، قلیائیت و سختی)، پارامترهای بیولوژیکی (شامل کل کلیفرم و HPC) و آلاینده‌های غیرآلی (شامل Mg، NO<sub>2</sub>، NO<sub>3</sub>، NO<sub>4</sub>، PO<sub>4</sub>، SO<sub>4</sub>، F، Cl و Fe). فلزات سنگین حتی در میزان خیلی کم بر روی

دلایل انتخاب پارامترهای استفاده‌شده: کلیه پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه براساس تاثیرات ذکرشده آن‌ها بر روی سلامتی انسان انتخاب شده‌اند. در گذشته، دانشمندان اثرات نامطلوب بسیاری از آلاینده‌ها بر روی انسان و محیط زیست را یافته و ذکر نموده‌اند، ولی بعلت رخداد کمتر آن‌ها در محیط زیست، دانشمندان استفاده از همه‌ی آن‌ها برای ارائه اندیس‌ها را ضروری نمی‌دانند. با این وجود، رشد صنایع و کشاورزی در جهان و همچنین رشد فزاینده جمعیت جهان، باعث ایجاد تغییراتی در وضعیت موجود گشته است. غلظت فلزات سنگین،

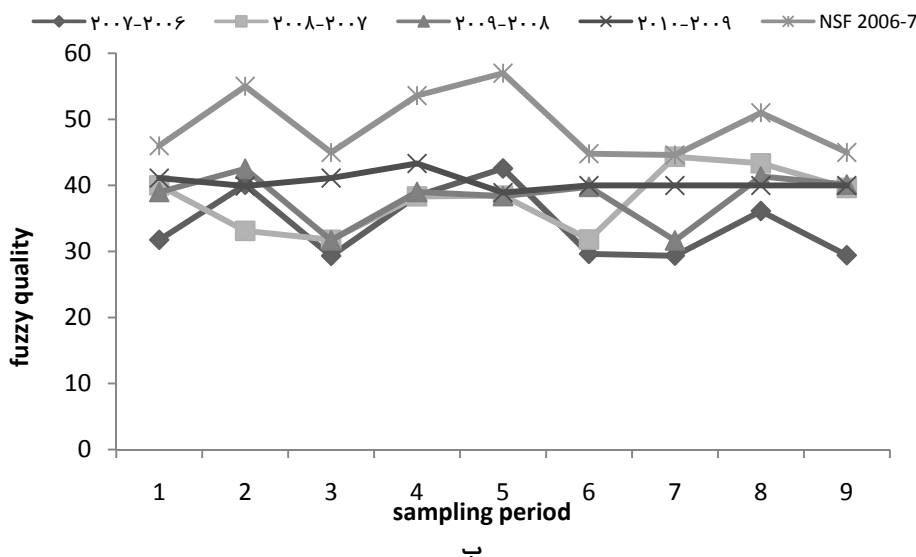
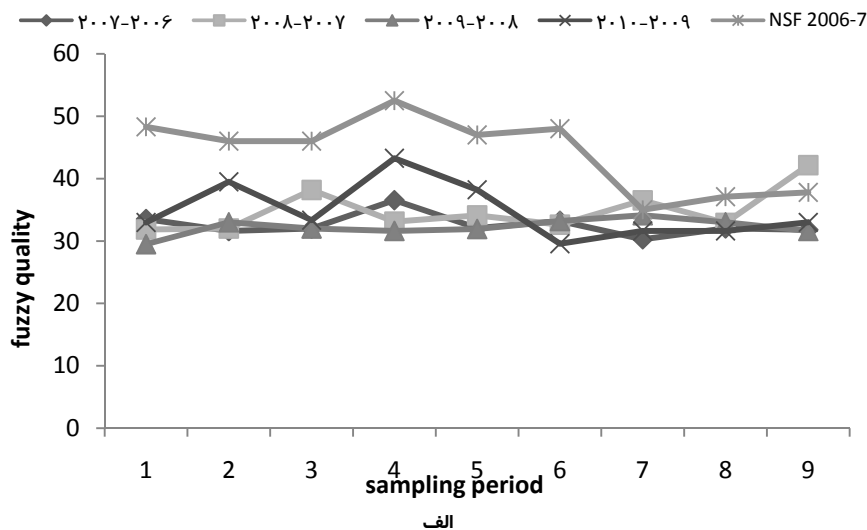


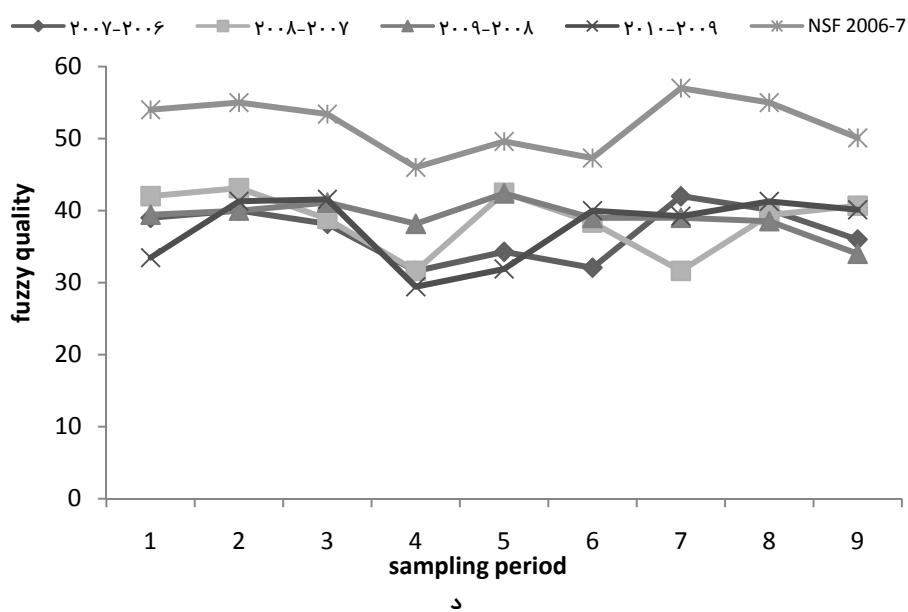
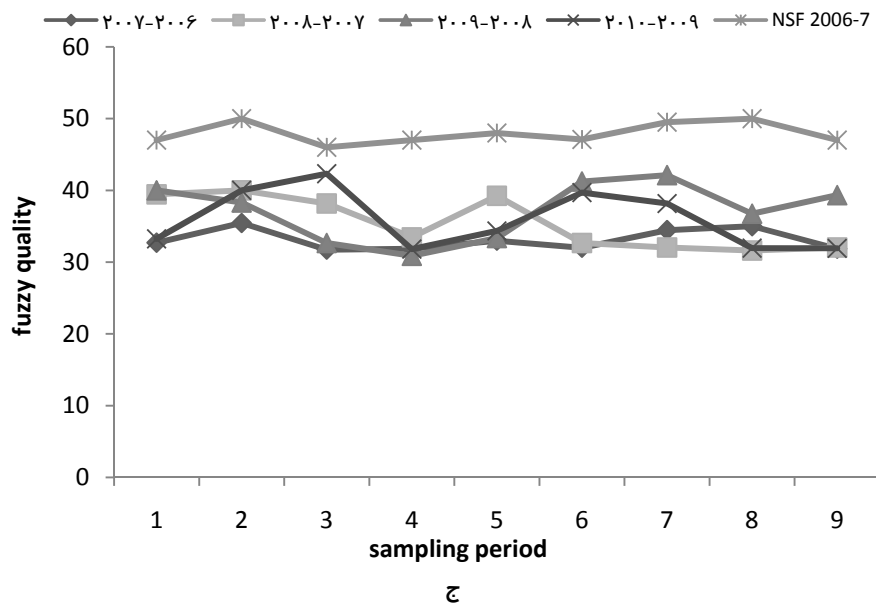
از تعداد بالای پارامترها این امکان را فراهم می‌کند که بتوان بر آورد دقیق‌تری از کیفیت آب مورد نظر داشت. در ارزیابی کیفیت آب قنات‌ها با استفاده از شاخص ارائه‌شده و مقایسه آن با نتایج خروجی از شاخص NSF نیز سختگیرانه‌تر بودن نتایج خروجی از این شاخص تایید می‌شود. باتوجه به استفاده از ۲۴ پارامتر کیفی در این مطالعه و تاثیرگذاری این پارامترها بر روی کیفیت آب و حضور اغلب این عوامل در منابع آبی و همچنین نبود یک شاخص کلی برای سنجش کیفیت آب‌های زیرزمینی و متفاوت بودن پارامترهای تاثیرگذار بر روی کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، می‌توان از شاخص ارائه‌شده جهت سنجش کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده نمود.

سلامت انسان‌ها تاثیرگذار می‌باشد. مهمترین خطر فلزات سنگین تجمع در زنجیره غذایی و پایداری آن‌ها در طبیعت می‌باشد [۳۰]. آفت‌کش‌ها نیز اگرچه در غلظت‌های خیلی کم در محیط‌های آبی یافت می‌شوند، ولی بعلت تجمع بیولوژیکی در بدن موجودات زنده و دز خطرزایی پایین دارای اهمیت وافر می‌باشند [۳۱]. بعلت بالابودن تعداد پارامترها امکان توضیح دلایل انتخاب همه آن‌ها وجود ندارد.

### نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، هدف ارائه یک شاخص کیفی برای آب‌های زیرزمینی با توجه کامل بر پارامترهای تاثیرگذار بر روی کیفیت آب و سلامت مصرف‌کننده بخصوص مصارف شرب انسانی بوده است. استفاده





شکل ۴. نتایج حاصل از سنجش کیفیت آب قنات‌های مورد نظر در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ با استفاده از شاخص طراحی شده و مقایسه نتایج بدست آمده برای داده‌های بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ با نتایج خروجی از شاخص NSF (الف) مکان نمونه برداری شماره ۱ (ب) مکان نمونه برداری شماره ۲ (ج) مکان نمونه برداری شماره ۳ (د) مکان نمونه برداری شماره ۴

Group	Parameters	Units	Very low			Low			Medium			High			Very high			Range
			a=b	C	d	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c=d	
1	pH	-	0	3	5	3	5	7	5	7	9	7	9	11	9	11	14	0-14
	TDS	mg/l	0	400	600	400	600	800	600	800	1000	800	1000	1200	1000	1200	10000	0-10000
2	Hardness	mg/l	0	100	150	150	200	250	200	250	300	250	300	3000	9	11	14	0-3000
	Alk.	mg/l	0	150	200	150	200	250	200	250	300	250	300	350	300	350	5000	0-5000
3	BOD	mg/l	0	1	2	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	20	0-20
	COD	mg/l	0	2	4	2	4	6	4	6	8	6	8	10	8	10	20	0-20
4	Cl	mg/l	0	100	200	100	200	300	200	300	400	300	400	500	400	500	6000	0-6000
	F	mg/l	0	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	5	6	7	0-7
5	Fe	mg/l	0	250	350	250	350	450	350	450	550	450	550	650	550	650	900	0-900
	Mg	mg/l	0	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	120	100	120	160	0-160
6	Total Coli	CFU/100ml	0	1	2	1	2	6	2	6	10	6	10	14	10	14	20000	0-20000
	HPC	µg/L	0	1	2	1	2	6	2	6	10	6	10	14	10	14	20000	0-20000
7	PO <sub>4</sub>	mg/l	0	1	2	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	0-6
	SO <sub>4</sub>	mg/l	0	200	400	200	400	550	400	550	700	550	700	850	700	850	1000	0-1000
8	No <sub>2</sub>	mg/l	0	1	2	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	0-6
	No <sub>3</sub>	mg/l	0	5	10	5	10	15	10	15	20	15	20	25	20	25	30	0-30
9	Pb	µg/L	0	10	15	10	15	20	15	20	25	20	25	30	25	30	40	0-40
	Hg	µg/L	0	1	2	1	2	3	2	3	4	550	700	850	700	850	1000	0-1000
10	Ba	µg/L	0	1	2	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	0-6
	Cd	µg/L	0	3	5	3	5	7	5	7	9	7	9	11	9	11	14	0-14
11	Atrazine	mg/l	0	2	4	2	4	6	4	6	8	6	8	10	8	10	12	0-12
	CCl <sub>4</sub>	mg/l	0	4	6	4	6	8	6	8	10	8	10	12	10	12	14	0-14
12	Chlordane	mg/l	0	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	5	6	8	0-8
	2-4-D	mg/l	0	60	80	60	80	100	80	100	120	100	120	140	120	140	200	0-200
	Fuzzy-based index	--	0	10	30	10	30	50	30	50	70	50	70	90	70	90	100	0-100

جدول ۱. پارامترهای انتخاب شده جهت طراحی شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی

## References

1. AWWA, Edzwald J. *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water (Water Resources and Environmental Engineering Series)*. 4 ed, New York: McGraw-Hill Professional. 2010: 134.
2. Nemerow N, Agardi F, Salvato J. *Environmental Engineering: Prevention and Response to Water-, Food-, Soil-, and Air-borne Disease and Illness*. 6 ed. New York: Wiley. 2009: 518.
3. Edmunds WM. The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study. *Science of The Total Environment*. 2003; (310): 25-35.
4. Muhammetoglu A, Yardimci A, A Fuzzy Logic Approach to Assess Groundwater Pollution Levels Below Agricultural Fields. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006; 118:337-354.
5. Broers HP, van der Grift B. Regional monitoring of temporal changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*. 2004; (296): 192-220.
6. Stigter TY, Ribeiro L, Carvalho Dill AMM. Application of a groundwater quality index as an assessment and communication tool in agro-environmental policies – Two Portuguese case studies. *Journal of Hydrology*. 2006; (327): 578-591.
7. Dahiya S. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; (147): 938-946.
8. Kwok-wing C. A review on integration of artificial intelligence into water quality modelling. *Marine Pollution Bulletin*. 2006; (52): 726-733.
9. Silvert W. Fuzzy indices of environmental conditions. *Ecological Modelling*. 2000; (130): 111-119.
10. Sowlat MH. A novel, fuzzy-based air quality index (FAQI) for air quality assessment. *Atmospheric Environment*. 2011; (45): 2050-2059.
11. Lermontov A. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. *Ecological Indicators*. 2009; (9): 1188-1197.
12. Ocampo-Duque W. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International*. 2006; (32): 733-742.
13. Mirabbasi R, Mazlounzadeh SM, Rahnama MB. Evaluation of irrigation water using fuzzy logic. *Research Journal of Environmental Sciences*. 2008; (2): 340-353.
14. Bezdek J. *Fuzzy Models for Pattern Recognition: Methods That Search for Structures in Data (IEEE Press Selected Reprint Series)*. First edition. New York. IEEE. 1992: 95.
15. Jang JSR, Chuen-Tsai S, Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE*. 1995; (83): 378-406.
16. Yang MS. A Survey of Fuzzy Clustering. *Mathematical and Computer Modelling*. 1993; (18):1-16.
17. Turksen IB. Measurement of membership functions and their acquisition. *Fuzzy Sets and Systems*. 1991; (40): 5-38.
18. Karr C. Genetic algorithms for fuzzy controllers. *AI Expert*. 1991; (6): 26-33.
19. Keller JM, Hunt DJ. Incorporating Fuzzy Membership Functions into the Perceptron Algorithm. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*. 1985; (7): 693-699.
20. Norwich AM, Turksen IB. A model for the measurement of membership and the consequences of its empirical implementation. *Fuzzy Sets and Systems*. 1984; (12):1-25.
21. Zadeh LA. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*. 1973; SMC-3:28-44.
22. Bezdek J. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms (Advanced Applications in Pattern Recognition)*. Springer. 1981: 123.
23. Takagi H, Hayashi I. NN-driven fuzzy reasoning. *International Journal of Approximate Reasoning*. 1991; (5):191-212.
24. Karr CL, Gentry EJ. Fuzzy control of pH using genetic algorithms. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 1993; (1): 46.
25. Ross JT. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. New York: John Wiley & Sons. 2004: 87-89.
26. Yager R, and Filev D. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994: 334-335.
27. Liu CW, Lin KH, Kuo YM. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of The Total Environment*. 2003; (313):77-89.
28. Crévecoeur S. Groundwater quality assessment of one former industrial site in Belgium using a TRIAD-like approach. *Environmental Pollution*. 2011; (159): 2461-2466.
29. Gangolli SD. Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds. *European Journal of Pharmacology: Environmental Toxicology and Pharmacology*. 1994; (292):1-38.

- 
30. Zaki NG, Khattab IA, Abd El-Monem NM. Removal of some heavy metals by CKD leachate. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; (147): 21-27.
31. Ormad MP. Pesticides removal in the process of drinking water production. *Chemosphere*. 2008; (71): 97-106.

# Designing Fuzzy-Based Ground Water Quality Index

Hassani Gh<sup>1</sup>, Mahvi A.H\*<sup>2</sup>, Nasserli S<sup>3</sup>, Arabalibeik H<sup>4</sup>, Yunesian M<sup>5</sup>, Gharibi H<sup>1</sup>

1. MSc student, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
2. Assistant professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
3. Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
4. Research Center for Science and Technology in Medicine (RCSTIM), Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
5. Associate professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

\* Corresponding author: Tel: 00982188954914 Fax: 00982166462267 E-mail: Ahmahvi89@yahoo.com

Received: 2011/10/16

Accepted: 2011/12/26

## ABSTRACT

**Background & Objectives:** Ground water is one of the important water resources. Quality indices are amongst the comprehensive and routine methods to evaluate water quality. Fuzzy Logic, as an appropriate method, applies artificial intelligence to develop complex and unknown systems e.g. environmental indices. This study aimed to provide a comprehensive index based on fuzzy logic and qualitative properties of ground water.

**Methods:** Considering their effects on water quality and human health, 24 physico-chemical parameters were used for this study. Qualitative index was designed based on Mamdani inference system and tested using the data obtained from aqueducts located within Yazd city.

**Results:** Fuzzy groundwater quality index provides more strict outputs than the NSF which uses nine parameters to present water quality. The differences observed might be due to differences in the number and interrelationships between parameters used for each index.

Assessment of Yazd's aqueducts water quality using Fuzzy index indicated that ground water quality is lower than the standard values set for drinking purposes.

**Conclusion:** According to the results obtained, the proposed index can be used as a comprehensive tool to present actual water quality, especially for drinking purposes.

**Keywords:** Water quality, Fuzzy inference, Yazd's aqueducts, Environmental index