Archive of SID

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۹، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۴، ص. ۱۱۳۰-۱۱۱۷

Journal of Water and Soil
Vol. 29, No. 5, Nov.-Dec. 2015, p. 1117-1130

# توسعه شاخص فازی پایش کیفی منابع آب (FWQI) (مطالعه موردی دشت ساوه)

سید محمد حسینی موغاری[۱]-کیومرث ابراهیمی [۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۵

## چکیده

آگاهی از کیفیت آب هر منطقه در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب ضروری است. یکی از روش‌های رایج در اظهارنظر در مورد کیفیت منابع آب، استفاده از شاخص‌های کیفیت منابع آب (WQIs) است. شاخص‌ها معمولا دارای محدودیت‌هایی است از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به‌ضرورت در دسترس بودن کلیه پارامترهای استفاده شده در توسعه هر شاخص اشاره کرد. همچنین برخورد قطعی با مسائل کیفیت آب نقطه ضعف دیگری برای این شاخص‌ها است. از این‌رو برای حل این دو محدودیت در مقاله حاضر با استفاده از سیستم استنتاج فازی (FIS) و بر اساس "*استلزام ممدانی*" و با کاربرد داده‌های کیفی آبخوان دشت ساوه، اقدام به توسعه شاخص کیفیت آب فازی (FWQI) شده است. هفت شاخص از نوع FWQI با پارامترهای کیفی مختلف توسعه داده شد. این شاخص‌ها برای مشخص کردن کیفیت آب ۱۷ چاه از دشت ساوه به کار گرفته شدند. به‌منظور در دسترس بودن معیاری برای قضاوت مقادیر برآوردی آن‌ها با مقادیر پایه و شناخته شده محاسبه شده بر اساس شاخص WQI مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در غیاب برخی از پارامترها، شاخص‌های FWQI با دقت بالایی 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. بررسی پایش کیفی آب چاه‌ها نشان داد که وضعیت آب آن‌ها از نظر شرب در شش چاه قابل قبول، در پنج چاه غیرقابل قبول و در شش چاه بسیار نامناسب است.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، استلزام ممدانی، سیستم استنتاج فازی، کیفیت آب

## مقدمه

در بسیاری از مناطق ایران، آب زیرزمینی تنها منبع تأمین نیازهای آبی مختلف است. این منبع از نظر کمی محدود بوده و با روند افزایشی برداشت‌ها در آینده نه چندان دور، به شدت دچار نقصان خواهد شد. از طرفی منبع آب جایگزینی برای تأمین نیازها در این مناطق وجود ندارد، در چنین شرایطی حفظ کیفیت منابع آب موجود اهمیت خود را نشان می‌دهد. آلودگی و کاهش کیفیت آب عملا موجب بلااستفاده شدن آن خواهد شد. از این‌رو آلودگی آب علاوه بر آسیب رساندن به سلامت انسان، توسعه اقتصادی-اجتماعی را نیز فلج می‌کند (۱۳). بررسی کیفیت آب، از گذشته مورد توجه محققین بوده است. روش‌های سنتی کنترل‌کیفیت آب، بر مبنای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی خاص و مقایسه آن با استانداردهای موجود بناشده‌اند. ازآنجایی‌که در این روش‌ها، تصمیم‌گیری بر مبنای یک پارامتر خاص انجام می‌شود، رویکرد مناسبی نیستند؛ به همین علت شاخص‌های کیفیت آب توسعه داده شده‌اند. این شاخص‌ها بر اساس چند پارامتر و با انجام یک سری عملیات ریاضی، عددی را برای تشخیص کیفیت آب نتیجه می‌دهند.

تحقیقات زیادی در زمینه پایش کیفیت آب، با رویکردهای مختلف انجام شده است. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۵) به ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی آبخوان ساوه و اراک پرداختند. آن‌ها طبقه‌بندی کیفی آب این دشت را از دیدگاه کشاورزی، به کمک روش ویل‌کاکس انجام دادند. بر این اساس آبخوان دشت ساوه در چهار دسته و آبخوان اراک به سه دسته طبقه‌بندی شد؛ به‌طور کلی ۱۶ درصد از مساحت آبخوان ساوه در کلاس $C_4$-$S_2$، ۴۶ درصد در کلاس $C_4$-$S_1$، ۳۰ درصد درکلاس $C_3$-$S_1$ و ۸ درصد در کلاس $C_2$-$S_1$ واقع شده‌اند. در مورد آبخوان اراک، ۴۲ درصد در کلاس $C_2$-$S_1$، ۵۶ درصد در کلاس $C_3$-$S_1$ و دو درصد در کلاس $C_2$-$S_1$ قرار گرفت. قمشیون و همکاران (۵) به پهنه‌بندی کیفی آب زیرزمینی دشت سمنان-سرخه پرداختند. ایشان از سه روش عکس فاصله، کریجینگ و کوکریجینگ

۱ و ۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: (Email: EbrahimiK@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID



برای پهنه‌بندی پارامترهای کیفی استفاده نمودند. آن‌ها تغییرات پنج پارامتر هدایت هیدرولیکی، کلر، غلظت املاح محلول، سدیم و سولفات را در سال‌های آبی ۷۹-۷۸ تا ۸۹-۸۸ مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج نشان داد روش کوکریجینگ دارای دقت مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌ها است. صاحب‌جلال و همکاران (۲۵) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی چهار پارامتر کیفی ب ر، کلر، شوری و نسبت جذبی سدیم برای دشت بهادران مهریز پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد، از نظر شوری ۴۸ درصد منطقه مورد مطالعه دارای محدودیت شدید و ۵۲ درصد دارای محدودیت کم تا متوسط است.

بک‌من و همکاران (۲) یک شاخص کیفی برای ارزیابی آلودگی آب زیرزمینی توسعه دادند و آن را برای مناطقی در فنلاند و اسلواکی به کار بستند. سعیدی و همکاران (۲۴)، با استفاده از هشت پارامتر کیفی، شاخصی برای پایش کیفیت آب زیرزمینی توسعه دادند. رضوان و گوردیپ (۲۰)، با استفاده از شاخص کیفیت آب[1] WQI و اطلاعات کیفی ۲۴ نقطه نمونه‌برداری از آب زیرزمینی منطقه‌ای در هند، تغییرات مکانی-زمانی کیفیت آب در این منطقه را مورد بررسی قرار دادند. سادات‌نوری و همکاران (۲۳)، به ارزیابی کیفیت آب دشت ساوه-نوبران با استفاده از شاخص WQI پرداختند؛ نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ۶۵ درصد از نمونه‌های آب دارای کیفیت پایین بوده و برای شرب مناسب نمی‌باشند. آن‌ها با پهنه‌بندی دشت بر اساس شاخص WQI بیان کردند که در مناطق مرکزی و شمال شرق دشت کیفیت آب نامناسب است.

استفاده از شاخص‌های کلاسیک کیفیت آب، دسته‌بندی‌های سخت‌گیرانه‌ای را نتیجه خواهند داد، در واقعیت تخطی ناچیز یک شاخص از مرزهای دسته‌بندی‌های ارائه شده برای آن، نه می‌تواند باعث بهبود آن‌چنانی کیفیت آب و نه تضعیف زیاد کیفیت آب گردد. برای حل این مشکل و نتیجه‌گیری‌های منطقی‌تر می‌توان از منطق فازی[2] در این زمینه استفاده نمود. در این زمینه هاشمی و همکاران (۶) به بررسی کیفیت آب زیرزمینی نه شهر در استان اصفهان، با استفاده از منطق فازی پرداختند. نتایج نشان داد از ۲۹ نمونه برداشت شده، ۱۰ نمونه با سطح اطمینان بین ۸۴ تا ۹۷ درصد در گروه مطلوب، نه نمونه با سطح اطمینان ۵۰ تا ۱۰۰ درصد، در سطح قابل قبول و ۱۰ نمونه با سطح اطمینان ۵۰ تا ۹۵ درصد، در گروه نامطلوب برای شرب قرار دارند. نخعی و ودیعتی (۱۶) به تجزیه و تحلیل کیفی آب زیرزمینی شهر تهران از نظر شرب با استفاده از منطق فازی پرداختند. ایشان از ۱۰ پارامتر کیفی برای این منظور استفاده نمودند. نتایج نشان داد که از بین نمونه‌های برداشت شده، ۱۵ نمونه قابل قبول و در ۱۳ نمونه غیر قابل قبول است. حسنی و همکاران (۷) با استفاده از منطق فازی، شاخص کیفیت آبی بر مبنای ۲۴ پارامتر کیفی، برای قنات‌های استان یزد ارائه نمودند. نتایج نشان داد، شاخص ارائه شده شاخص جامعی برای نشان دادن کیفیت واقعی آب به‌خصوص برای مصارف شرب است. ناصری و همکاران (۱۷) با استفاده از منطق فازی و بر اساس ۱۲ پارامتر کیفی به پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین پرداختند. نتایج حاکی از کارآیی روش پیشنهادی در پهنه‌بندی کیفی آب بود. صابری‌نصر و همکاران (۲۲) به منظور تحلیل کیفیت آب آبخوان طبس از منطق فازی استفاده کردند. آنها بر اساس ۱۰ پارامتر کیفی و با استفاده از سیستم استنتاج ممدانی، یک شاخص کیفیت آب برای طبقه‌بندی آب آبخوان طبس از نظر شرب توسعه دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که از ۲۸ نمونه مورد آزمایش، ۱۸ نمونه مطلوب، ۷ نمونه قابل قبول و ۳ نمونه در محدوده نامطلوب شرب قرار دارند.

اوکامپو-دوک و همکاران (۱۹) با استفاده از منطق فازی به بررسی کیفیت رودخانه ابرو[3] در اسپانیا پرداختند. ایشان در نتایج خود بیان کردند که روش‌های به‌کار گرفته شده می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین در برنامه‌های مدیریتی آب مورد استفاده قرار گیرد. داهیا و همکاران (۳) با استفاده از منطق فازی و بر اساس ۱۰ پارامتر کیفی، به طبقه‌بندی آب زیرزمینی ۱۶ روستا در جنوب هند، از نظر شرب پرداختند. نتایج نشان داد که از ۴۲ نقطه نمونه‌برداری، کیفیت ۴ نمونه مطلوب، ۲۳ نمونه قابل قبول و ۱۵ نمونه غیرقابل قبول است. لرمونتو و همکاران (۱۰) به ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ای در برزیل پرداختند، ایشان شاخصی کیفی بر مبنای منطق فازی برای این رودخانه توسعه دادند. نتایج نشان داد که شاخص فازی جدید می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای پایش کیفی رودخانه مورد مطالعه عمل کند.

لو و همکاران (۱۱) به توسعه یک شاخص کیفیت آب بر اساس ۹ پارامتر کیفیت آب با استفاده از منطق فازی پرداختند. ایشان شاخص توسعه یافته را در بررسی کیفیت آب رودخانه وی[4] در چین به کار بستند. نتایج حاکی از توانایی ارزیابی‌های فازی صورت گرفته در تعیین کیفیت آب رودخانه مورد مطالعه بود. صابری‌نصر و همکاران (۲۱) به منظور بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی استان یزد، از منطق فازی استفاده کرد. ایشان بر اساس ۱۲ پارامتر کیفیت آب ۷۱ چاه بهره‌برداری یک شاخص توسعه دادند. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص توسعه یافته، وضعیت کیفیت آب در ۴۹ نمونه از نظر شرب مناسب، در ۱۴ نمونه کیفیت پایین و در بقیه چاه‌ها کیفیت متوسطی دارد. اوکامپو- دوک و همکاران (۱۸) برای مطالعه کیفیت آب رودخانه کوکا[5] در کلمبیا از منطق فازی استفاده کردند. نتایج تحقیق ایشان

1-Water Quality Index
2- Fuzzy Logic
3-Ebro
4- Wei
5- Cauca

www.SID.ir

Archive of SID



نشان داد که منطق فازی ابزار مفیدی برای اظهار نظر در مورد کیفیت آب رودخانه مورد نظر است. میشرا و هـا (۱۴) از منطـق فـازی بـرای مدل‌سازی کیفیت آب از نظر شرب استفاده کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد، شاخص توسعه داده شده به خوبی می‌تواند به عنـوان یـک شاخص کیفی مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

در تحقیقات ذکر شده با دو رویکرد به ارزیـابی کیفـی منـابع آب مختلف پرداخته شده است. در رویکرد اول با کاربرد شاخص های پایه و شناخته شده به رده‌بندی و شناسایی کلاس های مختلف منـابع آب و همچنین پهنه‌بندی آنها توجه شده است. اما در رویکرد دوم محققین تلاش نموده‌اند تا با استفاده از منطق فازی نسـبت بـه بررسـی عـدم قطعیت‌ها در رده‌بندی‌ها بپردازند. تحقیقات گذشته بـر اسـاس توسـعه شاخص فازی بر اساس تمامی پارامترهـای مـورد اسـتفاده در توسـعه WQI و مقایسه نتایج حاصل بوده است و تحلیل حساسیتی بـر روی عملکرد FWQI با کاهش پارامترهای کیفی مورد استفاده انجام نشده است. در همین راستا در مقاله حاضر با تاکید بر بررسی امکان ارزیابی کیفیت منابع آب در شرایط کمبـود پارامترهـای مـورد نیـاز در تعیـین شاخص‌های پایه، منطق فازی بکار گرفته شد و شاخص‌های کیفیـت آب فازی توسعه داده شد. این نکته بخصوص در ارتباط با رده بنـدی منابع آب با لحاظ بخش مصرف ارزش خاصی پیدا می کند، چرا که به طور مثال منابع آب با کیفیت های متفاوت در بخـش هـای مختلـف کشاورزی (زراعت و باغبانی حتی بر اسـاس روش آبیـاری انتخـابی)، شرب، صنعت و پرورش گونه های مختلف آبزیـان مـی توانـد در رده بندی های کاملا متفاوتی قرار گیرند. لذا ارزش هر پارامتر بـر اسـاس نوع مصرف منابع آب متفاوت خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

### مطالعه موردی

دشت ساوه با مساحتی حدود ۳،۲۴۵ کیلومترمربع در شمال استان مرکزی واقع شده است. ارتفاع متوسط ایـن دشـت نسـبت بـه سـطح آبهای آزاد ۱،۱۰۸ متر است. متوسـط بارنـدگی و دمـای سـالانه ایـن دشت به ترتیب ۲۱۳ میلی‌متر و ۱۸/۲ درجه سانتی‌گراد اسـت. دشـت ساوه در مختصات '۴۵:°۳۴ تا '۰۳:°۳۵ عـرض شـمالی و '۰۸:°۵۰ تـا '۵۰:°۵۰ طول شرقی واقع شده است. پارامترهـای کیفـی مـورد نیـاز برای این تحقیق از چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه برداشت شده است (۶). خلاصه اطلاعات کیفی دشت ساوه در جدول ۱ آورده شـده است.

به منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینـی دشـت سـاوه بـر اسـاس شاخص‌های مورد نظر در این تحقیـق، از اطلاعـات ۱۷ چـاه در ایـن دشت استفاده گردید، موقعیت جغرافیایی این چاه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. اطلاعات مربوط به نه پارامتر ارائـه شـده در جـدول ۱، در چهار دوره نمونه‌برداری مربوط به اردیبهشت و شهریور ماه سال‌هـای ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ مورد استفاده قرار گرفت. این بازه زمانی به علت کامل بودن اطلاعات کیفی برداشت شده در تمامی چاه‌های مورد مطالعـه و هم‌چنین کفایت لازم برای بررسی عملکرد شاخص توسـعه داده شـده انتخاب گردید.

**جدول ۱- خلاصه‌ای از مقادیر پارامترهای کیفی دشت ساوه (۲۸)**

**Table 1- Summary statistics of the Saveh Plain's water quality parameters (28)**

| پارامتر<br>Parameter | واحد<br>Unit | کمینه<br>Min. | بیشینه<br>Max. | میانگین<br>Mean | انحراف معیار<br>Standard Deviation |
|---|---|---|---|---|---|
| منیزیم-Mg<br>Magnesium-Mg | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.25 | 44.72 | 6.27 | 6.28 |
| سدیم-Na<br>Natrium-Na | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.30 | 97.25 | 16.98 | 16.74 |
| پتاسیم-K<br>Potassium-K | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.01 | 1.53 | 0.11 | 0.11 |
| سولفات-SO4<br>Sulfate-SO4 | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.08 | 56.00 | 14.28 | 12.53 |
| کلر-Cl<br>Chlorine-Cl | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.12 | 119.22 | 14.10 | 18.69 |
| کل مواد جامد-TDS<br>Total Dissolved Solids-TDS | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 7.30 | 12140 | 1948.6 | 1855.2 |
| بی‌کربنات-HCO3<br>Bicarbonate-HCO3 | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.09 | 1.00 | 3.10 | 1.14 |
| کلسیم-Ca<br>Calcium-Ca | میلی‌گرم بر لیتر<br>( mg $lit^{-1}$) | 0.40 | 51.57 | 8.14 | 1.28 |
| pH | - | 6.42 | 8.9 | 8.01 | 0.28 |

www.SID.ir

Archive of SID



جدول ۲- موقعیت چاه‌های مورد مطالعه

Table 2- The position of selected wells

| شماره چاه Well No. | Utmy | Utmx | شماره چاه Well No. | Utmy | Utmx | شماره چاه Well No. | Utmy | Utmx |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3881500 | 429250 | 7 | 3873780 | 446141 | 13 | 3865220 | 458206 |
| 2 | 3881275 | 434010 | 8 | 3883400 | 446550 | 14 | 3874583 | 461555 |
| 3 | 3879200 | 441850 | 9 | 3882450 | 447250 | 15 | 3862923 | 462435 |
| 4 | 3878500 | 442250 | 10 | 3877813 | 447846 | 16 | 3861670 | 465250 |
| 5 | 3874520 | 442760 | 11 | 3873600 | 449000 | 17 | 3858760 | 468520 |
| 6 | 3881700 | 445300 | 12 | 3862600 | 449750 | | | |

## شاخص کیفیت آب (WQI)

هدف استفاده از یک شاخص WQI، ارائه یک معیار برای قضاوت در مورد کیفیت آب بر اساس چندین پارامتر است. در واقع شاخص WQI یک میانگین وزنی از چندین پارامتر کیفی است. هر پارامتر با توجه به اهمیتش، دارای وزن مختص به خود است. شاخص مورد استفاده در این مطالعه از نه پارامتر ارائه شده در جدول ۱ برای محاسبه WQI استفاده می‌کند. محاسبه این شاخص شامل چندین مرحله است؛ در مرحله اول به هر نه پارامتر بر مبنای تاثیر در سلامتی انسان، وزنی اختصاص داده می‌شود؛ این وزن‌ها در کنار استاندارد سازمان سلامت جهانی[1] (۲۹) در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. مرحله دوم، محاسبه وزن‌های نسبی بر اساس رابطه زیر است:

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

که در آن، $W_i$: وزن نسبی پارامتر $i$ام، $w_i$: وزن پارامتر $i$ام و $n$: تعداد پارامترها است. گام بعد محاسبه مقیاس رتبه‌بندی کیفی ($q_i$)، برای هر پارامتر است. $q_i$ بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه، $q_i$: رتبه کیفی پارامتر $i$ام، $C_i$: غلظت هر پارامتر در نمونه آب و $S_i$: استاندارد WHO برای هر پارامتر است. مرحله نهایی محاسبه WQI، به‌دست آوردن مجموع وزن‌دار $q$، بر اساس وزن مربوط به هر پارامتر است:

$$WQI = \sum_{i=1}^{n} W_i \times q_i \qquad (۳)$$

شاخص WQI نمونه‌های آب را به پنج کلاس کیفی طبقه‌بندی می‌کند. مقدار شاخص و طبقه متناظر با آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

1- World Health Organization

## استنتاج فازی

منطق فازی که اولین بار توسط زاده (۳۱) معرفی گردید، امکان استفاده از تجربه‌ها و دانش بشری را در مدل‌سازی فراهم می‌کند. این منطق ابزای توانمند جهت حل مسائل مربوط به سامانه‌های پیچیده، که درک آن‌ها مشکل و نیازمند استدلال و استنباط بشری است، به شمار می‌آید (۹). استنتاج فازی؛ نتیجه ترکیب منطق فازی با سامانه‌های خبره[2] است (۳۰). سامانه استنتاج فازی[3] (FIS)، بر اساس مجموعه‌ای از قوانین[4] بنا شده است. هر قانون یک رابطه‌ی " اگر←آنگاه" است که توسط متخصصین ایجاد می‌شود. از طریق این قوانین می‌توان تجربه‌ها و دانش بشری را وارد مدل نمود. در هر قانون، به بخشی که در آن، شرطها بیان می‌شوند، "مقدم" و به بخش مربوط به نتیجه، "تالی" گفته می‌شود.

یک FIS به‌طور کلی شامل چهار بخش، فازی‌سازی[5]، استلزام[6]، ترکیب[7] و غیرفازی‌سازی[8] است. در بخش فازی‌سازی، ورودی‌های قطعی FIS، با استفاده از توابع عضویت فازی تبدیل به مقادیر فازی می‌شوند. بخش استلزام، به‌منظور محاسبه یک رابطه فازی مانند $R$ بر اساس یک قانون مانند "اگر $A$ آنگاه $B$" مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع در این بخش با در دست بودن میزان صحت قسمت مقدم، میزان درستی قسمت تالی مشخص می‌شود. در قسمت ترکیب، نتایج حاصل از تمامی قوانین باهم ترکیب شده و یک مجموعه فازی را نتیجه می‌دهند. در بخش غیرفازی‌سازی، نتیجه قسمت قبل توسط روش‌های مختلفی به خروجی قطعی تبدیل می‌شود.

2- Expert Systems
3- Fuzzy Inference System
4- Rules
5- Fuzzification
6- Implication
7- Aggregation
8- Defuzzification

www.SID.ir

Archive of SID



جدول ۳- وزن مطلق و نسبی پارامترهای WQI (۲۳)

Table 3- The weight and relative weight of WQI parameters (23)

| نام پارامتر | Mg | Na | K | SO4 | Cl | TDS | HCO3 | Ca | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| استاندارد WHO WHO standard | 50 | 200 | 12 | 250 | 250 | 500 | 120 | 75 | 8.5 |
| وزن( $wi$ ) Weight | 3 | 4 | 2 | 5 | 5 | 5 | 1 | 3 | 3 |
| وزن نسبی ( $W_i$ ) relative weight | 0.097 | 0.129 | 0.065 | 0.161 | 0.161 | 0.161 | 0.032 | 0.097 | 0.097 |

جدول ۴- طبقه‌بندی کیفی آب بر اساس شاخص WQI

Table 4-Classification of groundwater quality according to WQI

| مقدار شاخص WQI value | <50 | 50-100 | 100-200 | 200-300 | 300< |
|---|---|---|---|---|---|
| طبقه آب Type of water | کیفیت عالی Excellent | کیفیت مناسب Good | کیفیت ضعیف Poor | کیفیت خیلی ضعیف Very Poor | غیرقابل مصرف برای شرب Uselessness |

مدل‌های فازی مختلفی توسط محققین ارائه گردیده است. مهم‌ترین این مدل‌ها، مدل ممدانی (۱۲) و سوگنو (۲۷) هستند. سامانه فازی ممدانی، به علت سادگی، کارآیی و متناسب بودن آن برای مسائل زیست‌محیطی، در مسائل کیفی استفاده زیادی دارد (۴، ۸ و ۲۶). به همین دلیل در این تحقیق از مدل فازی ممدانی برای طبقه-بندی کیفی آب استفاده شد. قوانین یک FIS بر اساس استلزام ممدانی به صورت کلی زیر قابل بیان هستند:

$$Rule_i: if \quad x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \quad Then \quad z \text{ is } C_i \quad \forall i = 1,...,n \qquad (۴)$$

در این رابطه، $Rule_i$: قانون شماره $i$ام، $x$ و $y$: متغیرهای ورودی، $A_i$ ، $B_i$ و $C_i$ مجموعه‌های فازی و $z$: متغیر خروجی (نتیجه) است. در مدل ممدانی بایستی بر اساس دانش متخصص برای هر متغیر یک یا چندین تابع عضویت تعریف شود. مقدار عددی متغیر در هر تابع عضویت، دارای یک درجه عضویت است، که بر اساس این درجه عضویت، تاثیر مقدار آن در خروجی قانون نوشته شده مشخص می‌شود. در ادامه توابع عضویت خروجی از تمام قانون‌ها بر اساس عملگر کمینه ترکیب می‌شوند و یک تابع عضویت نهایی را نتیجه می‌دهند. در پایان، مرکز ثقل تابع عضویت نهایی به عنوان خروجی قطعی گزارش می‌شود. شکل ۱ یک مدل استنتاج ممدانی با دو قانون را نشان می‌دهد در این شکل خطچین‌های عمودی مقدار متغیرهای ورودی x و y و خطهای افقی درجه عضویت هر متغیر در تابع عضویت مربوط به خود را نشان می‌دهند. توابع عضویت A و B مربوط به بخش مقدم و تابع عضویت C مربوط به بخش تالی هر قانون است. تابع عضویت موجود در ردیف سوم حاصل ترکیب تابع عضویت C، بر اساس نتایج حاصل از دو قانون موجود است. مقدار $Z_0$ خروجی قطعی حاصل از این سامانه است.

## توسعه شاخص کیفیت آب فازی (FWQI)

برای هر نه پارامتر معرفی شده در شاخص WQI، توابع عضویتی در نظر گرفته شد. توابع در نظر گرفته شده، به صورت توابع عضویت مثلثی یا ذوزنقه‌ای می‌باشند. این توابع عضویت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

تابع عضویت مثلثی:

$$f(x;a,b,c) = \begin{cases} 0 & x < a \text{ or } c < x \\ \dfrac{a-x}{a-b} & a \le x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \end{cases} \qquad (۵)$$

تابع عضویت ذوزنقه‌ای:

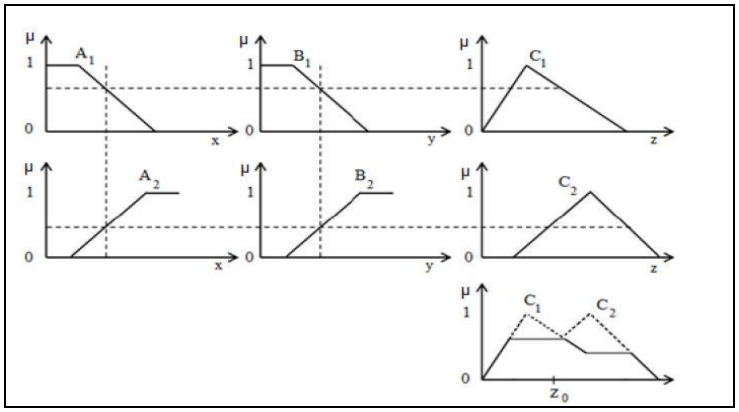
$$f(x;a,b,c,d) = \begin{cases} 0 & x < a \text{ or } d < x \\ \dfrac{a-x}{a-b} & a \le x \le b \\ 1 & b \le x \le c \\ \dfrac{d-x}{d-c} & c \le x \le d \end{cases} \qquad (۶)$$

با توجه به رابطه ۵ و ۶ برای هر یک از پارامترها توابع عضویت مناسب انتخاب گردید. این توابع بر اساس استانداردها و دانش متخصصین می‌تواند در نظر گرفته شوند. جدول ۵، مقدار پارامترهای توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. توابع مثلثی، با سه پارامتر و توابع ذوزنقه‌ای با چهار پارامتر مشخص شده‌اند.

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۱- مدل استنتاج ممدانی (۱)**

**Figure 1- Mamdani Inference System (1)**

پارامتر pH، دارای بازه‌ای متفاوت نسبت به سایر پارامترها است، زیرا مقادیر کم و زیاد این پارامتر، در مسائل کیفیت آب، مشکل‌زا خواهد بود. بنابراین برای پارامتر pH، نه تابع عضویت و برای سایر پارامترها پنج تابع عضویت در نظر گرفته شده است. پارامترهای موجود در جدول ۵ در سه گروه دسته‌بندی شدند. گروه اول پارامترهای TDS، Cl و SO4، گروه دوم پارامترهای HCO3، K و Na و گروه سوم پارامترهای Ca، Mg و pH را شامل می‌شوند.

برای توسعه شاخص کیفیت آب فازی[1] (FWQI)، نیازمند استفاده از FIS هستیم. به طور دقیق‌تر در اینجا FWQI از چهار FIS تشکیل شده است. در FIS اول پارامترهای گروه اول مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این FIS، از سه ورودی، ۱۲۵ قانون و یک خروجی تشکیل شده است. FIS دوم که پارامترهای گروه دوم را در برمی‌گیرد، وضعیتی مشابه FIS اول دارد. FIS سوم نیز مشابه دو FIS قبل است با این تفاوت که به خاطر وجود pH در این گروه تعداد قوانین مربوط به این FIS، ۲۲۵ قانون است. خروجی‌های حاصل از سه FIS قبل، ورودی‌های یک FIS دیگر را تشکیل می‌دهند که خروجی این FIS بر اساس ۱۲۵ قانون نوشته شده، شاخص FWQI می‌باشد. مشخصات توابع عضویت مربوط به FWQI، در جدول ۶ ارائه شده است. از آنجا که ارائه کلیه قوانین نوشته شده امکان‌پذیر نمی‌باشد، برخی از این قوانین در جدول ۷ نشان داده شده‌اند.

در ادامه FIS در ایجاد شاخص کیفیت آب با تعداد پارامترهای کمتر بکار گرفته شد. بدین منظور شش شاخص فازی دیگر توسعه داده شد، که در هر یک از این شش شاخص یک یا دسته‌ای از پارامترهای ذکر شده حذف شدند. بنابراین شاخص‌های توسعه داده شده به صورت زیر می‌باشند:

$$FWQI1 = f(Group1, Group2, Group3) \quad (۷)$$

$$FWQI2 = f(Group1 - \{Cl\}, Group2, Group3) \quad (۸)$$

$$FWQI3 = f(Group1, Group2 - \{K\}, Group3) \quad (۹)$$

$$FWQI4 = f(Group1, Group2, Group3 - \{Ca\}) \quad (۱۰)$$

$$FWQI5 = f(Group2, Group3) \quad (۱۱)$$

$$FWQI6 = f(Group1, Group3) \quad (۱۲)$$

$$FWQI7 = f(Group1, Group2) \quad (۱۳)$$

که در این روابط، FWQI1 تا FWQI7 هفت شاخص کیفیت آب فازی توسعه داده شده، $Group1 = \{TDS, Cl, SO4\}$، $Group2 = \{HCO3, K, Na\}$ و $Group3 = \{pH, Ca, Mg\}$ می‌باشند.

## نتایج و بحث

همانطور که در بخش مواد و روشها تشریح شد، پس از توسعه شاخص‌های FWQI، به منظور ارزیابی کافی شاخص ها بررسی کیفی آب زیرزمینی ۱۷ چاه مورد مطالعه بر اساس این شاخص‌ها و شاخص WQI پرداخته شد. بررسی نتایج حاصل از دو شاخص WQI و FWQI1 نشان داد، هر دو شاخص در اکثر موارد عملکرد مشابه‌ای داشته‌اند. بر اساس این دو شاخص، کیفیت آب در چاه‌های شماره ۱، ۲، ۶، ۱۲، ۱۳ و ۱۷ مناسب است. مقدار هر دو شاخص در این شش چاه در دوره مورد بررسی زیر ۱۰۰ است، بنابراین می‌توان در صورت لزوم از این چاه‌ها به منظور تامین نیاز شرب استفاده نمود. بر اساس این دو شاخص کیفیت آب چاه‌های شماره ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۶ بسیار نامناسب است و استفاده از آن برای شرب توصیه نمی‌گردد. به‌طور مختصر و با در نظر گرفتن هر دو شاخصFWQI1 و WQI می‌توان گفت که کیفیت آب در چاه‌های مورد بررسی در ۳۵ درصد موارد مناسب در ۳۰ درصد موارد نامناسب و در بقیه موارد بسیار نامناسب است. این نتایج بیان‌گر وضعیت مناسبی از نظر کیفیت آب در چاه‌های مورد بررسی نیست، بنابراین در صورتی که نیاز به حفر چاه به منظور تامین نیاز شرب وجود دارد بایستی مکان‌یابی مناسبی بدین

1- Fuzzy Water Quality Index

www.SID.ir

Archive of SID



منظور صورت پذیرد.

در مورد شاخص‌های فازی دو، سه و چهار نتایج نشان داد که حذف پارامترها در مورد شاخص دوم کمی نتیجه را تغییر داده است اما در مورد شاخص سوم و چهارم نتیجه تغییرات بسیار جزئی داشته است. این نتایج گواه آن است که با توجه به گروه‌بندی‌های صورت گرفته، پارامتر Cl کمی در کیفیت آب منطقه تاثیرگذار است اما پارامترهای K و Ca تاثیری در طبقه‌بندی کیفی آب منطقه ندارد. بنابراین با نبود یکی از پارامترهای مورد بحث نیز می‌توان به نتیجه‌گیری درستی در مورد کیفیت آب یک منطقه دست پیدا کرد.

**جدول ۵- مشخصات توابع عضویت پارامترهای مورد استفاده**

**Table 5– Characteristics of the applied membership functions**

| پارامتر Parameter | Na | | | | TDS | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| وضعیتStatus | a | b | c | d | a | b | c | d |
| مطلوبVery Good | 0 | 0 | 100 | 200 | 0 | 0 | 400 | 600 |
| خوبGood | 100 | 200 | 300 | - | 400 | 600 | 800 | - |
| متوسطModerate | 200 | 300 | 400 | - | 600 | 800 | 1200 | - |
| بدBad | 300 | 400 | 500 | - | 800 | 1200 | 3000 | 4000 |
| خیلی بدVery Bad | 400 | 500 | 1000 | 1000 | 3000 | 4000 | 12000 | 12000 |
| پارامترParameter | Cl | | | | Mg | | | |
| وضعیتStatus | a | b | c | d | a | b | c | d |
| مطلوبVery Good | 0 | 0 | 100 | 300 | 0 | 0 | 40 | 90 |
| خوبGood | 100 | 300 | 400 | - | 40 | 90 | 140 | - |
| متوسطModerate | 300 | 400 | 500 | - | 90 | 140 | 200 | - |
| بدBad | 400 | 500 | 600 | - | 140 | 200 | 260 | - |
| خیلی بدVery Bad | 500 | 600 | 2000 | 2000 | 200 | 260 | 500 | 500 |
| پارامترParameter | K | | | | SO4 | | | |
| وضعیتStatus | a | b | c | d | a | b | c | d |
| مطلوبVery Good | 0 | 0 | 5 | 14 | 0 | 0 | 200 | 300 |
| خوبGood | 5 | 14 | 20 | - | 200 | 300 | 400 | - |
| متوسطModerate | 14 | 20 | 30 | - | 300 | 400 | 500 | - |
| بدBad | 20 | 30 | 40 | - | 400 | 500 | 600 | - |
| خیلی بدVery Bad | 30 | 40 | 50 | 50 | 500 | 600 | 1000 | 1000 |
| پارامترParameter | Ca | | | | HCO3 | | | |
| وضعیتStatus | a | b | c | d | a | b | c | d |
| مطلوبVery Good | 0 | 0 | 40 | 90 | 0 | 0 | 50 | 140 |
| خوبGood | 40 | 90 | 140 | - | 50 | 140 | 200 | - |
| متوسطModerate | 90 | 140 | 200 | - | 140 | 200 | 250 | - |
| بدBad | 140 | 200 | 260 | - | 200 | 250 | 300 | - |
| خیلی بدVery Bad | 200 | 260 | 500 | 500 | 250 | 300 | 400 | 400 |
| پارامترParameter | pH | | | | pH | | | |
| وضعیتStatus | a | b | c | d | a | b | c | d |
| مطلوبVery Good | 7 | 8 | 9 | - | - | - | - | - |
| خوبGood | 6 | 7 | 8 | - | 8 | 9 | 10 | - |
| متوسطModerate | 5 | 6 | 7 | - | 9 | 10 | 11 | - |
| بدBad | 4 | 5 | 6 | - | 10 | 11 | 12 | - |
| خیلی بدVery Bad | 0 | 0 | 4 | 5 | 11 | 12 | 14 | 14 |

www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۶- مشخصات توابع عضویت شاخص FWQI**

**Table 6– Characteristics of the Membership functions of FWQI**

| آب کیفیت Type of water | عالی Excellent | | | | مناسب Good | | | ضعیف Poor | | | ضعیف خیلی Very Poor | | | مصرف غیرقابل Uselessness | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عضویت تابع membership function | a | b | c | d | a | b | c | a | b | c | a | b | c | a | b | c | d |
| | 0 | 0 | 30 | 70 | 30 | 70 | 120 | 70 | 120 | 230 | 120 | 230 | 320 | 230 | 320 | 500 | 500 |

**جدول ۷- برخی قوانین استفاده شده در توسعه شاخص FWQI**

**Table 7– Some utilized rules for FWQI development**

| FIS | شماره قانون The rules No. | مقدم Antecedent | | | | | | تالی Consequent |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | اگر If | باشد is | و اگر and if | باشد Is | و اگر and if | باشد is | آنگاه then |
| خروجی۱ Output 1 | 1 | TDS | مطلوب Very Good | Cl | مطلوب Very Good | SO4 | مطلوب Very Good | عالی Excellent |
| | 10 | TDS | مطلوب Very Good | Cl | خوب Good | SO4 | خیلی بد Very Bad | ضعیف Poor |
| | 50 | TDS | خوب Good | Cl | خیلی بد Very Bad | SO4 | خیلی بد Very Bad | خیلی ضعیف Very Poor |
| | 80 | TDS | بد Bad | Cl | مطلوب Very Good | SO4 | خیلی بد Very Bad | خیلی ضعیف Very Poor |
| خروجی۲ Output 2 | 5 | HCO3 | مطلوب Very Good | K | مطلوب Very Good | Na | بد Bad | مناسب Good |
| | 30 | HCO3 | خوب Good | K | مطلوب Very Good | Na | خیلی بد Very Bad | ضعیف Poor |
| | 90 | HCO3 | بد Bad | K | متوسط Moderate | Na | خیلی بد Very Bad | خیلی ضعیف Very Poor |
| | 120 | HCO3 | خیلی بد Very Bad | K | بد Bad | Na | خیلی بد Very Bad | غیر قابل مصرف Uselessness |
| خروجی۳ Output 3 | 20 | pH | مطلوب Very Good | Ca | مطلوب Very Good | Mg | خیلی بد Very Bad | ضعیف Poor |
| | 60 | pH | متوسط Moderate | Ca | خوب Good | Mg | بد Bad | ضعیف Poor |
| | 140 | pH | خوب Good | Ca | بد Bad | Mg | خیلی بد Very Bad | خیلی ضعیف Very Poor |
| | 206 | pH | خیلی بد Very Bad | Ca | متوسط Moderate | Mg | خیلی بد Very Bad | غیر قابل مصرف Uselessness |
| FWQI | 7 | خروجی۱ Output 1 | عالی Excellent | خروجی۲ Output 2 | مناسب Good | خروجی ۳ Output 3 | ضعیف Poor | مناسب Good |
| | 19 | خروجی۱ Output 1 | ضعیف Poor | خروجی۲ Output 2 | ضعیف Poor | خروجی ۳ Output 3 | ضعیف Poor | ضعیف Poor |
| | 110 | خروجی۱ Output 1 | خیلی ضعیف Very Poor | خروجی۲ Output 2 | خیلی ضعیف Very Poor | خروجی ۳ Output 3 | خیلی ضعیف Very Poor | خیلی ضعیف Very Poor |
| | 120 | خروجی۱ Output 1 | خیلی ضعیف Very Poor | خروجی۲ Output 2 | غیر قابل مصرف Uselessness | خروجی ۳ Output 3 | غیر قابل مصرف Uselessness | غیر قابل مصرف Uselessness |

بررسی نتایج حاصل از سه شاخص فازی ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهد FWQI5 به‌خوبی نتوانسته است وضعیت کیفی چاه‌های مورد مطالعه را نشان دهد. این شاخص مقدار کمتری را نسبت به سایر شاخص‌ها برآورد کرده است و کیفیت آب در اکثر چاه‌ها بر اساس این شاخص در

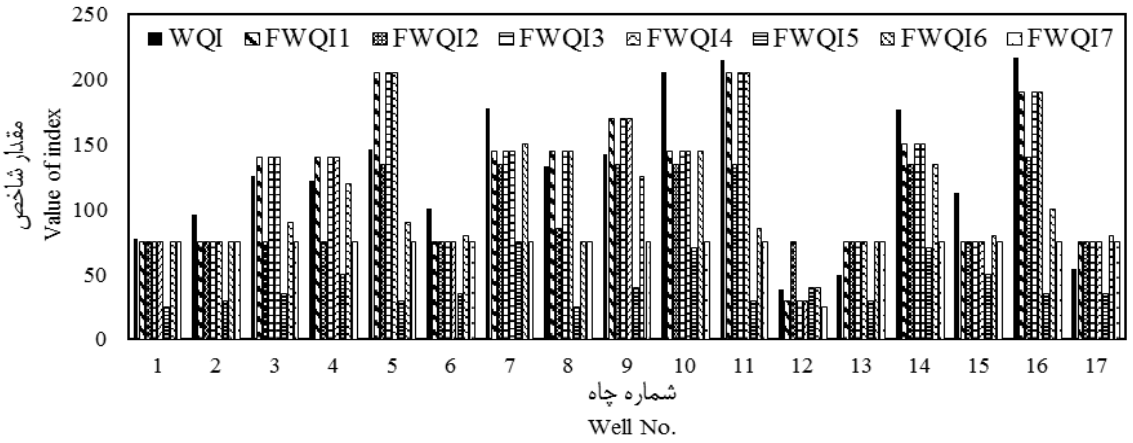
www.SID.ir

Archive of SID



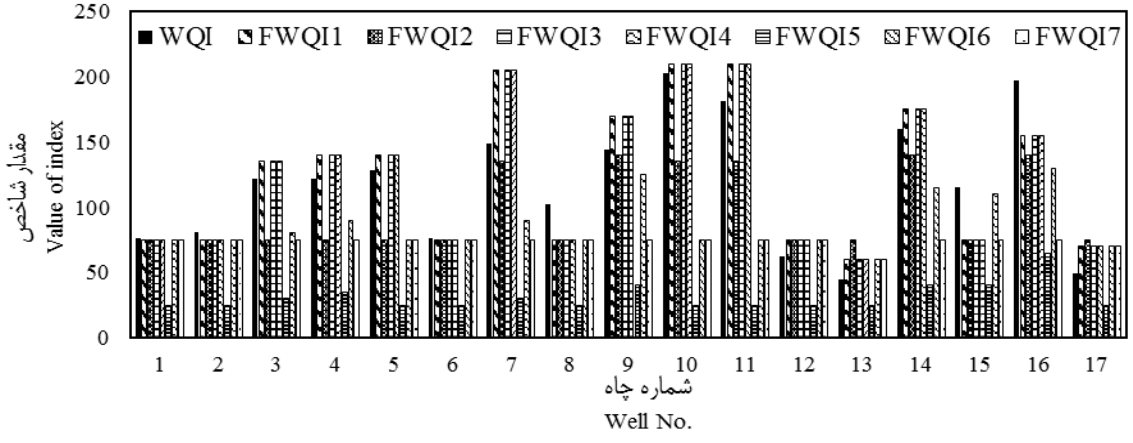
طبقه عالی قرار گرفته‌اند. علت این امر را می‌توانـد در عـدم حضـور پارامتر TDS در محاسبه این شاخص دانست. زیرا اکثر چاه‌ها از نظـر TDS وضعیت مناسبی ندارند به همین دلیل با حذف شدن این پارامتر نمی‌توان به درک صحیحی از کیفیت آب در منطقه رسید. بنابراین در صورتی که منابع آب در یک منطقه از لحاظ یک پارامتر کیفـی دارای محدودیت است آن پارامتر بایستی در تعیین شاخص کیفی آب منطقه مورد استفاده قرار گیرد. از میان دو شاخص دیگر هر دو در اکثر مـوارد عملکرد یکسانی داشته‌اند اما به طور کلی می‌توان گفت که FWQI6 بهتر از FWQI7 وضعیت کیفی آب چاه‌های مـورد بررسـی را نشـان داده است. شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ مقادیر شاخص WQI در کنار هفت شاخص FWQI مورد بحث در این مقاله در ۱۷ چاه مطالعاتی دشـت ساوه در بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهند.

با توجه به شکل‌های ۲ تا ۵ با وجود برخی اختلاف‌های نسبتا زیاد بین WQI و FWQI1 در برخی موارد مانند کیفیت آب در چاه شماره ۵ و ۱۰ در اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۴، به طور کلـی هـر دو شـاخص، وضعیت تقریبا یکسانی از کیفیت آب در چاه‌های مورد مطالعه را نتیجه داده‌انـد. از آنجـا کـه توسـعه یـک شـاخص WQI قطعـی، نیازمنـد پارامترهای مشخص و اغلب با در نظر گرفتن وزنی برای هـر پـارامتر صورت می‌پذیرد، کاری دشوار و قطعا دارای ایراد خواهد بود؛ زیرا هـم عدم قطعیت، جزیی جدانشدنی از مسائل زیست‌محیطی اسـت و هـم برخوردهای سخت‌گیرانه با این مسائل دور از منطق و واقعیـت اسـت. شاخص‌های FWQI2، FWQI3 و FWQI4 نیز با وجـود اینکـه بـر اساس هشت پارامتر توسعه داده شده‌اند، وضعیت کیفی آب را به خوبی نشان می‌دهند. بنابراین شاخص‌هـای FWQI1 تـا FWQI4 توسـعه یافته، می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص WQI باشند.




**شکل ۲- مقادیر WQI و FWQI برای اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۴**

**Figure 2- WQI and FWQI (May 2005)**



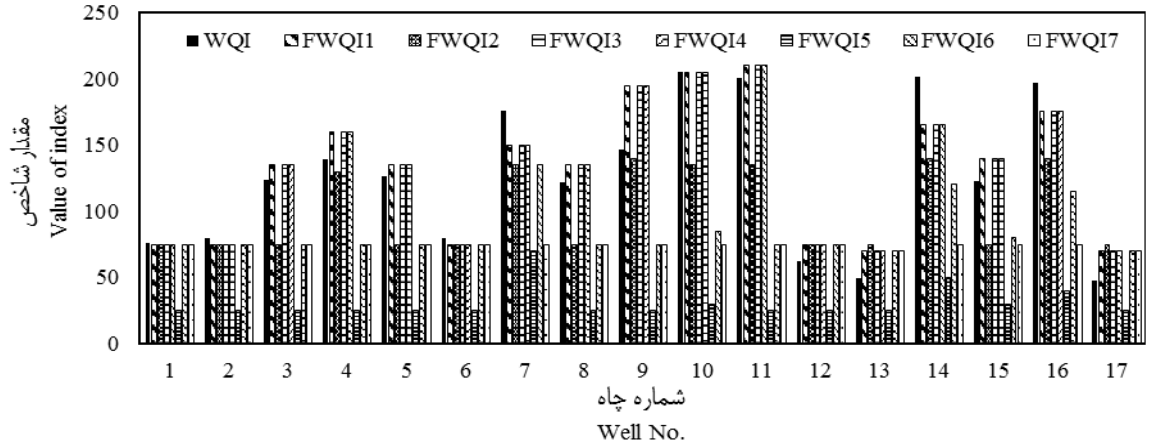

**شکل ۳- مقادیر WQI و FWQI برای شهریور ماه سال ۱۳۸۴**

**Figure 3- WQI and FWQI (September 2005)**

www.SID.ir

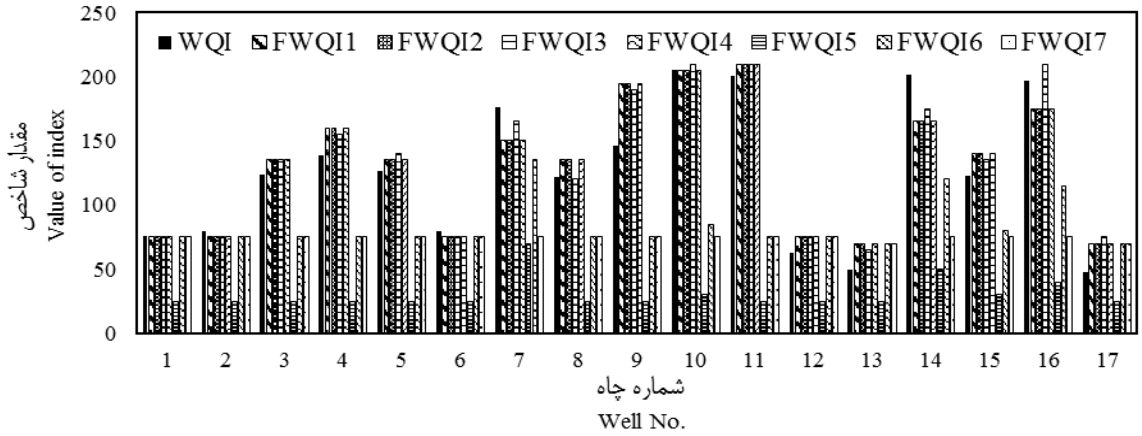
Archive of SID






**شکل ۴- مقادیر WQI و FWQI برای اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۵**

**Figure 4- WQI and FWQI (May 2006)**




**شکل ۵- مقادیر WQI و FWQI برای شهریور ماه سال ۱۳۸۵**

**Figure 5- WQI and FWQI (September 2006)**

از آنجا که هدف از این مقاله ارزیابی توانایی FIS به عنوان یک سامانه دانش‌مبنا در تعیین کیفیت آب است، پارامترهای در نظر گرفته شده مطابق با پارامترهای شاخص WQI بوده‌اند؛ تا بتوان نتایج را بر اساس مبنای پذیرفته شده، بررسی و تحلیل نمود. حال که توانایی FIS در این رابطه مشخص شده است در مناطق دیگر نیز می‌توان از آن استفاده نمود. یکی از بزرگترین مزیت‌های استفاده از FIS در تعیین کیفیت آب در یک منطقه، بررسی کیفی آب بر اساس پارامترهای اندازه‌گیری شده در منطقه است؛ زیرا که پارامتر مشخصی برای توسعه یک FWQI لازم نیست و در هر منطقه با توجه به اطلاعات در دسترس، می‌توان شاخص مناسبی را توسعه داد. در حالی که شاخص‌های کیفی قطعی مانند شاخص WQI مورد استفاده در این تحقیق، بر اساس پارامترهای خاصی توسعه داده شده‌اند که وجود تمامی پارامترهای برای محاسبه آن الزامی است. در به‌کارگیری هر دو نوع شاخص قطعی و فازی توجه به این نکته ضروری است که اگر پارامتر کیفیت آبی که مقدار آن خارج از بازه مطلوب است در فرآیند محاسبه شاخص نادیده گرفته شود، در طبقه‌بندی کیفی آب دچار خطا خواهیم شد.

در یک جمع بندی، بر اساس نتایج به‌دست آمده، مشخص شد مدل‌های دانش‌مبنا مانند FIS می‌توانند به‌طور موفقیت آمیزی در مسائل گوناگون به کار گرفته شود. مزیت این مدل‌ها وارد کردن تجربه‌های بشری در فرآیند حل مسئله است. علاوه بر این مزیت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود و انعطاف‌پذیری FIS آن را به ابزاری مناسب جهت بررسی پدیده‌های درگیر با عدم قطعیت تبدیل می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که حضور برخی از پارامترهای کیفیت آب که از نظر استانداردها در محدوده نامناسب قرار دارند، در توسعه شاخص مورد نظر الزامی است، بنابراین با توجه به نوع مصرف (کشاورزی، شرب، صنعت و پرورش آبزیان) می‌توان پارامترهای کیفی مهم مختص به مصرف مورد نظر را استخراج و بر اساس آن پارامترها، شاخص‌های بومی برای هر منطقه و کاربرد را توسعه داد.

www.SID.ir

Archive of SID



## نتیجه‌گیری کلی

هدف مقاله حاضر بررسی قابلیت FIS در ارائه شاخصی به منظور پایش کیفیت آب زیرزمینی در ۱۷ چاه در دشت ساوه بود. بدین منظور هفت شاخص فازی با پارامترهای کیفی مختلف توسعه داده شد. پارامترهای کیفی مورد استفاده شامل نه پارامتر ارائه شده در جدول ۱ می‌باشند. FISها بر اساس رویکرد ممدانی و با در نظر گرفتن توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای موجود در جدول ۵ توسعه داده شدند. برای هر پارامتر پنج وضعیت مطلوب، خوب، متوسط، بد و خیلی بد در نظر گرفته شد و با نوشتن قوانین "اگر← آنگاه" شاخص‌های FWQI توسعه گردیدند.

در ادامه به منظور ارزیابی کارآیی این شاخص‌ها از یک شاخص کیفی دیگر (WQI) که مبنای قطعی دارد، استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد، شاخص‌های FWQI1، FWQI2، FWQ3 و FWQI4 به خوبی می‌توانند وضعیت کیفی آب را تعیین نمایند. بر این اساس از ۱۷ چاه مورد بررسی کیفیت شش چاه از نظر شرب قابل قبول بوده است، کیفیت پنج چاه غیر قابل قبول، و کیفیت شش چاه دیگر بسیار نامناسب بوده است. شاخص‌های FWQI5، FWQI6 و FWQI7 که بر مبنای شش پارامتر از نه پارامتر مورد بحث توسعه داده شدند، توانایی مناسبی در تعیین کلاس کیفی آب از خود نشان نداند، که علت آن را می‌توان در نادیده گرفتن پارامترهای تاثیرگذار در کیفیت آب منطقه، در فرآیند توسعه این شاخص‌ها جستجو کرد.

نتایج حاصل از این تحقیق با سایر تحقیقات مشابه، هم‌خوانی دارد. برای مثال شاخص فازی توسعه یافته توسط حسنی و همکاران (۷) که به منظور تعیین کیفیت آب قنات‌های استان یزد توسعه یافته است، عملکرد مناسبی در تعیین کیفیت آب داشته است. لرمونتو و همکاران (۱۰) نیز به نتایج مشابهی در توسعه یک شاخص فازی برای رودخانه‌ای در برزیل رسیدند. اوکامپو–دوک و همکاران (۱۸ و ۱۹) نیز بر اساس نتایج تحقیق خود بر روی کاربرد منطق فازی در ارزیابی کیفی آب، بیان کردند که فFIS می‌تواند با موفقیت در زمینه‌های ارزیابی کیفیت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین میشرا و جا (۱۴) بر اساس نتایج تحقیق خود در زمینه طبقه‌بندی کیفیت آب، استفاده از FIS را ابزاری مناسب و با انعطاف‌پذیری مناسب در زمینه طبقه‌بندی کیفیت آب معرفی کردند.

با توجه به آنچه که گفته شد FIS می‌تواند در مسائل کیفیت آب به‌عنوان یک ابزار مناسب در فرآیند تصمیم‌گیری به ما کمک کند. FIS علاوه بر مزیت‌های نظیر مدل کردن عدم قطعیت‌های حاکم بر سامانه و وارد کردن دانش بشری در محاسبات، برتری دیگری نسبت به شاخص‌های کیفیت آب قطعی دارد و آن اینکه در هر منطقه بر اساس پارامترهای کیفی موجود می‌تواند گزارش‌های مناسبی در مورد کیفیت کلی آب ارائه دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی با در نظر گرفتن پارامترهای کیفی دیگر قابلیت FIS در ارائه شاخصی مناسب برای پایش کیفی آب مورد بررسی قرار گیرد.

## سپاسگزاری

بدینوسیله از دانشگاه تهران و شرکت سهامی آب منطقه ای اراک به خاطر تامین امکانات و داده‌های لازم جهت انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

1- Alayón S., Robertson R., Warfield S.K., and Ruiz-Alzola J. 2007. A fuzzy system for helping medical diagnosis of malformations of cortical development. Journal of biomedical informatics, 40(3): 221-235.

2- Backman B., Bodiš D., Lahermo P., Rapant S., and Tarvainen T. 1998. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. Environmental Geology, 36(1-2): 55-64.

3- 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.

4- 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.

5- Ghomeshion, M., Malekian, A., Hoseini, K., Gharachelo, S., and Khamoushi, M.R. 2012. A survey on spatial variations of groundwater quality in Semnan/Sorkheh plain using geostatistical techniques. Iranian journal of Range and Desert Reseach, 19(3):545-535. (in Persian with English abstract)

6- Hashemi S.E., Mousavi S.F., Taheri S.M., and Ghareh-Chahi A. 2010. Analysis of Groundwater Quality Acceptability for Drinking purposes in Nine Cities in Isfahan Province Using Fuzzy Inference System. Iran-Water Resources Research, 6(18): 25-34. (in Persian with English abstract)

7- Hassani G., Mahvi A.H., Nasseri S., Arabalibeik H., Yunesian M., and Gharibi H. 2011. Designing Fuzzy-Based Ground Water Quality Index. Journal of health (Ardabil University of medical sciences), 3(1):18-31. (in Persian with English abstract)

www.SID.ir

Archive of SID




8- Icaga Y. 2007. Fuzzy evaluation of water quality classification. Ecological Indicators, 7(3): 710-718.

9- Korepazan Dezfoli A. 2006. Fuzzy sets theory and its applications in modeling water engineering problems. Jahad Daneshgahi of Amirkabir University, Tehran. (in Persian)

10- 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.

11- Lu X., Li L.Y., Lei K., Wang L., Zhai Y., and Zhai, M. 2010. Water quality assessment of Wei River, China using fuzzy synthetic evaluation. Environmental Earth Sciences, 60(8): 1693-1699.

12- Mamdani E.H. 1976. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. International Journal of Man-Machine Studies, 8(6): 669-678.

13- Milovanovic M. 2007. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. Desalination, 213(1): 159-173.

14- Mishra N., and Jha P. 2014. Fuzzy expert system for drinking water quality index. Recent Research in Science and Technology, 6(1): 122-125.

15- Mohammadi Ghaleni M., Ebrahimi K., and Araghinejad Sh. 2010. Groundwater Quantity and Quality Evaluation: A Case Study for Saveh and Arak Aquifers. Journal of Water and Soil Sciences, 21(2):93-108. (in Persian with English abstract)

16- Nakhei M., and Vadeei M. 2012. Fuzzy analysis of groundwater of Tehran province with drinking purpose. Journal of the Geological of Iran, 6(23): 37-46. (in Persian)

17- Nasseri M., Tajrishy M., reza Nikoo M., and Zaherpour J. 2013. Recognition and Spatial Mapping of Multivariate Groundwater Quality Index using Combined Fuzzy Method. Journal of Water and Wastewater, 24(85): 82-93. (in Persian with English abstract)

18- Ocampo-Duque W., Ferre-Huguet N., Domingo J.L., and Schuhmacher M. 2006. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. Environment International, 32(6): 733-742.

19- Ocampo-Duque W., Osorio C., Piamba C., Schuhmacher M., and Domingo J.L. 2013. Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: application to the Cauca River, Colombia. Environment international, 52: 17-28.

20- Rizwan R., and Gurdeep S. 2010. Assessment of Ground Water Quality Status by Using Water Quality Index Method in Orissa, India. World Applied Sciences Journal, 9(12): 1392-1397.

21- Saberi Nasr A., Rezaei M., and Dashti Barmaki M. 2013. Groundwater contamination analysis using Fuzzy Water Quality index (FWQI): Yazd province, Iran. Geopersia, 3(1): 47-55.

22- Saberi Nasr A., Rezaei M., Dashti Barmaki M., and Mansouri Majoumerd J. 2013. Evaluating Mamdani Fuzzy Inference System Usage in the Analysis of Groundwater Quality, Case Study: Tabas Aquifer. Iranian Journal of Water & Environment Engineering, 1(1): 25:34. (in Persian with English abstract)

23- 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. Environmental Earth Sciences: 71(9): 3827-3843.

24- Saeedi M., Abessi O., Sharifi F., and Meraji H. 2010. Development of groundwater quality index. Environmental monitoring and assessment, 163(1-4): 327-335.

25- Sahebjalal E., Dehghany F., and Tabatabaeezade M.S. 2013. Investigating Spatio-Temporal Variations of Groundwater Quality Using Kriging Method. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science, 17(65): 51-61. (in Persian with English abstract)

26- Scannapieco D., Naddeo V., Zarra T., and Belgiorno V. 2012. River water quality assessment: A comparison of binary-and fuzzy logic-based approaches. Ecological Engineering, 47: 132-140.

27- Sugeno M. 1985. Industrial applications of fuzzy control. Elsevier Science Inc.

28- Water Quality Data Report of Saveh Plain. 2011. Regional Water Organization of Arak. (in Persian)

29- WHO. 2004. Guidelines for drinking water quality: training pack. WHO, Geneva, Switzerland.

30- Yager R.R., and Filev D.P. 1994. Essentials of fuzzy modeling and control. John Wiley and Sons, New York.

31- Zadeh L.A. 1965. Fuzzy sets. Information and control, 8(3): 338-353.


www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil
Vol. 29, No. 5, Nov.-Dec. 2015, p. 1117-1130

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۹، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۴، ص. ۱۱۳۰-۱۱۱۷

# Development of a Fuzzy Water Quality Index (FWQI) – Case study: Saveh Plain

**S.M. Hosseini-Moghari[1] - K. Ebrahimi[2*]**

Received: 19-02-2014
Accepted: 16-03-2015

**Introduction:** Groundwater resources are the main source of fresh water in many parts of Iran. Groundwater resources are limited in quantity and recently due to increase of withdrawal, these resources are facing great stress. Considering groundwater resources scarcity, maintaining the quality of them are vital. Traditional methods to evaluate water quality insist on determining water quality parameter and comparison between them and available standards. The decisions in these methods rely on just specific parameters, in order to overcome this issue, water quality indices (WQIs) are developed. Water quality indexes include a range of water quality parameters and using mathematical operation represent an index to classify water quality. Applying the classic WQI will cause deterministic and inflexible classifications associated with uncertainties and inaccuracies in knowledge and data. To overcome this shortcoming, using the fuzzy logic in water resources problems under uncertainty is highly recommended. In this paper, two approaches are adopted to assess the water quality status of the groundwater resources of a case study. The first approach determined the classification of water samples, whilst the second one focused on uncertainty of classification analysis with the aid of fuzzy logic. In this regard, the paper emphasizes on possibility of water quality assessment by developing a fuzzy-based quality index even if required parameters are inadequate.

**Materials and Methods:** The case study is located in the northwest of Markazi province, Saveh Plain covers an area of 3245 $km^2$ and lies between 34º45′-35º03′N latitude and 50º08′-50º50′E longitudes. The average height of the study area is 1108 meter above mean sea level. The average precipitation amount is 213 mm while the mean annual temperature is 18.2$^{o}$C. To provide a composite influence from individual water quality parameters on total water quality, WQI is employed. In other words, WQI is a weighting average of multiple parameters. The present research used nine water quality parameters (Table 2). In this paper Fuzzy Water Quality Indices (FWQIs) have been developed, involving fuzzy inference system (FIS), based on Mamdani Implication. Firstly, five linguistic scales, namely: *Excellent, Good, Poor, Very poor, and Uselessness* were taken into account, and then, with respect to *'If→then'* rules the FWQIs were developed. Later, the seven developed FIS-based indexes were compared with a deterministic water quality index. Indeed seven FWQIs based on different water quality available parameters have been developed. Then developed indices were used to evaluate the water quality of 17 wells of Saveh Plain, Iran.

**Results and Discussion:** The present study analysed groundwater quality status of 17 wells of Saveh Plain using FWQI and WQI. Based on the driven results from WQI and its developed fuzzy index, similar performance was observed in most of the cases. Both of them indicated that the water quality in six wells including NO.1, 2, 6, 12, 13, and 17 were suitable for drinking. Due to the fact that the values of both indexes were under 100, the mentioned wells could be considered as drinking water supplies. The indexes illustrated the very poor quality of wells NO.7, 9, 10, 11, 14, and 16. As a result, according to FWQI1 along with WQI, nearly 35% of wells have proper drinking water quality, while approximately 30% and 35% of them suffered from poor and very poor quality, respectively. The overall picture of water quality within the study area was not satisfying, hence, an accurate site selection for discovering water recourses with appropriate quality for drinking purpose must be responsible authorities' priority. Analysis of *FWQI2*, *FWQI3* and *FWQI4* revealed that elimination of the parameters slightly changed the result of *FWQI2*; however, *FWQI3* and *FWQI4* did not vary considerably. Thus, *Cl* influenced the water quality slightly, but *Ca* and *K* did not affect the water quality of the plain. The results showed that inexistence of one of the mentioned parameters would not affect the computational process adversely. A glance at *FWQI5*, *FWQI6* and *FWQI7* revealed the improper performance of *FWQI5* to show wells' water quality status. Throughout the *FWQI5* evaluation process, all the wells' water quality stood in *Excellent* category. Due to the considerable values of TDS in the Plain, elimination of this parameter in *FWQI5* caused inappropriate evaluation. Hence, whenever a case study deals with a high value of a specific quality parameter, elimination of that parameter would negatively demote validation of the analysis. Figures (3)-(6) represented the results of WQI along with seven *FWQI*s for 17 utilized wells' water quality assessment in the study area during

1,2- Ph.D Student of Water Resources Engineering, and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran
(*-Corresponding Author Email: EbrahimiK@ut.ac.ir)

www.SID.ir

Archive of SID



the proposed periods.

**Conclusion:** Throughout the present study, the capability of seven FIS-based indexing procedures in modelling the water quality analysis of 17 wells of Save Plain was discussed. The proposed FWQIs were developed on the basis of Mamdani approach by applying triangular and trapezoidal membership functions to determine the groundwater quality of the case study according to the nine parameters. The results revealed that *FWQI1-4* outperformed others. On the other hand, *FWQI5-7* which eliminated three out of the nine parameters, did not made a valid contribution to the computational context. This might be related to omitting the effective water quality parameters from the inputs of the model. The results also illustrated that, only six out of 17 wells of the region could be considered as suitable sources for the drinking purpose. The water quality status in five wells was not satisfying, and six wells were plagued by very poor quality of water.

**Keywords:** Groundwater, Mamdani Implication, Fuzzy Inference System, Water quality

www.SID.ir