نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۵، ص. ۱۷۱-۱۵۵

Water Management in Agriculture
Vol. 13, No. 1, Spring and Summer 2026, 155-171

مقاله علمی - پژوهشی

روندیابی فازی کیفیت آب در حوزه آبریز گرگان‌رود برای مصارف کشاورزی

علی حشمت‌پور*[۱]، سید جواد سجادی[۲]، سید ایلیا سیدی[۳]

چکیده

آب سطحی به‌عنوان یک عامل کلیدی در تخصیص بهینه منابع آب رودخانه‌ها برای مصارف کشاورزی است. شاخص‌ها در تعیین کیفیت آب به‌ویژه درزمینه کشاورزی کاربرد فراوانی دارند. اما این شاخص‌ها به دلیل ارائه کیفیت آب به‌صورت قطعی، پایش دقیق آن را به چالش می‌کشد. لذا در این مطالعه، تغییرات کیفیت آب چهار رودخانه زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای در حوزه آبریز گرگان رود با شاخص IRWQIsc به دو روش فازی و غیرفازی مقایسه شده است. به این منظور، نمونه‌های آبی هر دو هفته از آبان ۱۴۰۱ تا اردیبهشت ۱۴۰۲ جمع‌آوری و پارامترهای PH ، EC، DO، NO_3^-، NH_4^+، PO_4 و TH مطابق استاندارد APHA اندازه‌گیری شدند. پس از نرمال‌سازی مقادیر با منحنی‌های شاخصIRWQIsc، مدل فازی مبتنی بر سیستم استنتاج سوگنو با توابع عضویت ذوزنقه‌ای و بیست قانون «اگر–آنگاه» در محیط پایتون پیاده‌سازی شد تا عدم قطعیت و پراکندگی داده‌ها به‌صورت پیشرفته‌تر تحلیل شود. نتایج نشان داد میانگین داده‌های خروجی ایستگاه‌ها برای تعیین کیفیت آب درروش فازی برابر ۸۰،۵۸ با انحراف معیار ۵،۳۸ و ضریب تغییرات ۰،۰۶۶۷ است، درحالی‌که میانگین کل داده‌ها درروش غیر فازی برابر با ۷۷،۳۱، انحراف معیار ۸،۵۷ و ضریب تغییرات ۰،۱۱۰۷ بود؛ بنابراین، مدل فازی دقت و انسجام بیشتری ارائه داده است. به‌علاوه، در ۷۵،۵٪ نمونه‌ها، طبقه‌بندی کیفیت در هر دو روش مشابه بود و در ۲۴،۵٪ باقیمانده، مدل فازی حساسیت بیشتری در شناسایی نقاط مرزی و بحرانی نشان داد. علاوه بر این، کیفیت آب در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها در سطح «خوب» تا «خیلی خوب» طبقه‌بندی شدند. درنتیجه، با توجه به کاهش عدم قطعیت در ارزیابی‌ها و حساسیت بالاتر در شناسایی نواحی مرزی کیفیت آب توسط منطق فازی، این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای تصمیم‌گیری مدیران منابع آب در برنامه‌ریزی‌های مربوطه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: برآورد عدم قطعیت، پایداری منابع، کیفیت آب سطحی، مقایسه شاخص‌ها، منطق فازی

مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی، نقشی تعیین‌کننده در تأمین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت دارند که بخش زیادی از نیاز آبی جوامع را پوشش می‌دهند (خسرویان، ۲۰۲۴؛ UN-Water and UNESCO, 2024) که آگاهی از کیفیت آب آن‌ها می‌تواند کمک شایانی به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب نماید (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین بر اساس گزارش UNESCO و UN-Water بررسی و پایش کیفیت منابع آبی و برنامه‌ریزی جامع برای حفظ و مدیریت پایدار آن، ازجمله مسائل کلیدی در مدیریت منابع آب به شمار می‌آید. ازاین‌رو، مدیریت کیفیت آب نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و مدون است تا ضمن حفظ کیفیت آب، امکان بهره‌برداری بهینه از آن فراهم شود (UNESCO and UN-Water, 2024.).

غالباً برای روند یابی کیفیت آب از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود بااین‌حال یکی از چالش‌های اساسی در به‌کارگیری این شاخص‌ها، ارائه یک خروجی قطعی به‌صورت کمی و کیفی، برای تعیین کیفیت آب است (Chitnis and Patel, 2015). نتایج پژوهش صفاری نیا و همکاران (۱۳۹۹) و معین زاده و همکاران نشان می‌دهد که روش‌های قطعی ارزیابی کیفیت آب، به دلیل نادیده گرفتن میزان فاصله پارامترها از حدود مجاز، کارایی مطلوبی ندارند (Moeinzadeh et al., 2024.)

در نقطه مقابل، روش‌های فازی با لحاظ کردن میزان مقبولیت پارامترها نسبت به استانداردهای مربوطه، این محدودیت را برطرف می‌کنند. به‌علاوه، شاخص فازی شده به دلیل توانایی در لحاظ کردن

[۱]- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس. ایران (*- نویسنده مسئول: Heshmatpoura@gmail.com)
[۲]- استادیارگروه تولیدات گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد گاووس، گنبد کاووس، ایران
[۳]- کارشناسی علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶
DOR: 10.22034/wmaj.2025.529492.1269

عدم قطعیت، دقت بالاتری نسبت به شاخص‌های قطعی دارد. این ویژگی امکان مقایسه هم‌زمان تمامی پارامترها را فراهم کرده و منجر به افزایش دقت نتایج می‌شود (Ross, 2010). لذا، می‌توان گفت که کیفیت آب در بستر یک عدم قطعیت قرار داشته و کمیتی فازی است (صفاری نیا و همکاران، ۱۳۹۹؛ حشمت پور و سجادی، ۱۴۰۳). این پارادوکس در مدیریت کیفی منابع آب می‌تواند منجر به خطاهای برنامه‌ریزی برای کارشناسان و مدیران بخش آب شود.

با توجه به چالش‌های مطرح‌شده، محققان ازجمله بلینی و همکاران (Bellini et al., 2025) و ودیعتی و همکاران (۱۳۹۲) و نوروزیان و همکاران (Norouzian et al., 2001)، تکنیک طبقه‌بندی فازی کیفیت آب را به‌عنوان روشی مؤثر و کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت کیفیت آب پیشنهاد کرده‌اند. اولادیپو و همکاران در مطالعه مقایسه‌ای بین شاخص قطعی کیفیت آب و روش استنتاج فازی، اثربخشی بیشتر منطق فازی را تأیید کردند (Oladipo et al., 2021). همچنین، یانگ و همکاران نشان دادند که منطق فازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید و عینی در مدل‌سازی محیطی به کار گرفته شود (Yang et al., 2021). این قابلیت، منطق فازی را قادر می‌سازد تا پیشرفت قابل‌توجهی در روش‌شناسی تعیین شاخص کیفیت آب ایجاد کند (Kachroud et al., 2019). علاوه بر این، نگنویتسکی و دکا و کامبالیمس اشاره‌کرده‌اند که قوانین فازی می‌توانند با پرداختن به عدم قطعیت‌ها درشدت آلودگی و سطح کیفی آب رودخانه‌ها، توضیحات کمی و کیفی دقیق‌تری ارائه دهند (Negnevitsky , 1993; Kambalimath and Deka, 2020). تراچ و همکاران نیز در تحقیقی به بررسی، ارزیابی و پیش‌بینی شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از مدل‌های منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) پرداختند. این پژوهش باهدف اصلاح روش ارزیابی WQI در اوکراین، مدل‌سازی آن با منطق فازی و ایجاد یک مدل ANN برای پیش‌بینی WQI انجام شد. این تحقیق به این نتیجه رسید که مدل منطق فازی می‌تواند با داده‌های مبهم، نامشخص و زبانی کار کند و در حل مشکلات پیچیده محیطی با متغیرهای ورودی متعدد و وابستگی‌های پیچیده بین آن‌ها، کارآمد است (Trach et al., 2022). همچنین، حشمت پور و سجادی (۱۴۰۳) در پژوهشی با استفاده از منطق فازی و شاخص ویلکاکس، نشان دادند که فازی سازی می‌تواند ابهام موجود در مرز کلاس‌های کیفیت آب را کاهش دهد و تصویر دقیق‌تری از وضعیت کیفی آب رودخانه ارائه کند. این نتایج حاکی از آن است که روش فازی در مقایسه با رویکرد قطعی، توانایی بیشتری در بیان تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب آبیاری دارد. بدین ترتیب، منطق فازی می‌تواند به‌عنوان ابزاری جایگزین و مناسب در ارزیابی روند تغییرات کیفیت آب مورداستفاده قرار گیرد. باوجود اهمیت و کارایی منطق فازی در ارزیابی کیفیت آب، تعیین و روند یابی کیفیت آب رودخانه‌ها با استفاده از قوانین فازی در حوزه موردمطالعه کمتر موردتوجه قرارگرفته است. لذا، هدف پژوهش حاضر، بررسی کیفیت آب چهار رودخانه زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای در استان گلستان با استفاده از شاخص کیفیت منابع آب سطحی ایران ($IRWQI_{sc}$) به کمک منطق فازی بوده است. بنابراین، این تحقیق در تلاش است تا با ارائه نتایج دقیق‌تر در طبقه‌بندی کیفی آب، به سؤالات مربوط به تخصیص بهینه آب برای مصارف کشاورزی پاسخ مناسب ارائه نماید.

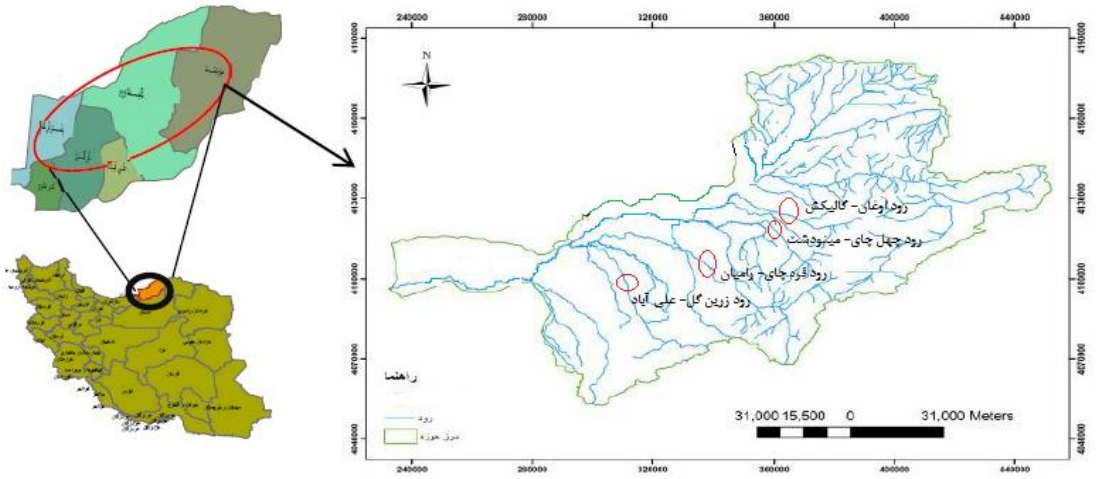
مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

استان گلستان به لحاظ موقعیت جغرافیایی و سایر عوامل محیطی از اکوسیستم‌های مختلف و متنوعی تشکیل گردیده است که در بین آن‌ها اکوسیستم‌های آبی چه در بخش رودخانه‌ای و تالابی و چه در بخش دریایی دارای ویژگی‌های خاص بوده و بسیار حائز اهمیت می‌باشند. حوزه گرگان رود از ارتفاعات شرق و جنوب شرقی استان گلستان شروع و درنهایت به دریای خزر ختم می‌شود (شکل ۱).

نمونه‌برداری آب

ابتدا در منطقه موردبررسی چهار رودخانه زرین گل، قره‌چای، چهل چای و اوغان انتخاب شدند. نمونه‌برداری در بازه زمانی ۷ ماه (از آبان تا اردیبهشت‌ماه سال ۱۴۰۲)، صورت گرفت. در طول دوره نمونه‌برداری هر دو هفته یک‌بار برداشت با ظروف شیشه‌ای و ۲ لیتری (درمجموع ۱۴ نمونه) و از محل خروجی رودخانه‌ها صورت گرفت. نمونه‌ها تحت شرایط استاندارد به آزمایشگاه دانشگاه گنبدکاووس انتقال یافت. با توجه به شاخص کیفی آب (IRWQI) و روش استاندارد (APHA)، پارامترهای نیترات (NO_3^-)، درصد اکسیژن محلول (DO٪)، هدایت الکتریکی (EC)، آمونیوم (NH_4^+)، فسفات (PO_4)، سختی کل (TDS) و (PH)، در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- موقعیت رودخانه گرگان رود در ایران و استان گلستان به همراه محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری

نحوه اندازه‌گیری پارامترها

آمونیوم (NH_4^+)

برای اندازه‌گیری آمونیوم از روش رنگ‌سنجی فنولات استفاده شد. پس از واکنش معرف‌ها، جذب نوری نمونه‌ها با اسپکتروفتومتر در ≈ ۶۳۰nm خوانده‌شده و غلظت از روی منحنی استاندارد تعیین شد.

نیترات (NO_3^-)

برای اندازه‌گیری نیترات از روش اولتراویوله استفاده شد که رایج‌ترین روش اندازه‌گیری نیترات آب اولترا ویوله (UV) است و این روش برای آب‌های غیر آلوده و آب‌هایی که مواد آلی آن کم می‌باشد مناسب است.

درصد اکسیژن محلول (%DO)

برای اندازه‌گیری مقدار درصد اکسیژن محلول در آب از دستگاه واترچکر در محل نمونه‌برداری استفاده گردید و مقدار آن قرائت و ثبت گردید.

هدایت الکتریکی (EC)

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب، از دستگاه هدایت سنج مدل AZ 86503 استفاده گردید. بدین‌صورت که پس از هم زدن نمونه آب، الکترود را در داخل نمونه غوطه‌ور نموده و پس از چند ثانیه که عدد هدایت ثابت گردید هدایت الکتریکی بر اساس میکرو زیمنس یا میلی زیمنس قرائت شد.

فسفات (PO_4)

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری فسفر به طریق کالریمتری وجود دارد و انتخاب روش بستگی به غلظت فسفات دارد. در این تحقیق از روش اسپکتوفتومتریک برای اندازه‌گیری غلظت میزان فسفات استفاده شد و از روی منحنی استاندارد با توجه به میزان جذب غلظت فسفر (برحسب میلی‌گرم فسفر در لیتر) و از طریق رابطه (۱)، غلظت فسفر در نمونه موردنظر تعیین گردید.

$$\frac{mgp(104.5)\times 1000}{mlsample} \qquad (۱)$$

سختی کل (TH)

در این تحقیق از روش کمپلکسومتری (حجم‌سنجی) با استفاده از محلول استاندارد EDTA در حضور معرف اریوکروم بلک تی استفاده‌شده است. برای اندازه‌گیری سختی کل از محلول ۰/۰۱EDTA مولار محلول بافری معرف Eriochrom black T و سولفید سدیم استفاده شد. درنهایت مقدار محلول مصرف‌شده EDTA (برحسب cc) ضرب‌در ۴۰ شد و درنهایت مقدار سختی به دست آمد.

PH

برای اندازه‌گیری PH، ابتدا آب فیلتر شد و بعد با استفاده از کاغذ PH و یا دستگاه اندازه‌گیری PH، میزان PH آن تعیین گردید.

شاخص کیفی $IRWQI_{sc}$[1]

پس از تعیین میزان پارامترها با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌گرفته بر روی نمونه‌های آب با استفاده از شاخص IRWQI، ارزش کمی و کیفی هر یک از پارامترها محاسبه شد. در این روش برای ارزیابی کیفیت آب سطحی از رابطه (۲) استفاده شد

[1] IRanainWater Quality Index for Surface Water Resources-Conventional Parameters

که برای به دست آوردن آن به سه عامل مقدار کیفی و شاخص رتبه‌بندی (جهت هم مقیاس سازی) و وزن دهی (جدول ۲) پارامترهای مدل $IRWQI_{sc}$ نیاز بود (جدول ۱).

$$IRWQI = \left[\prod_{i=1}^{n} I_i^{W_i}\right]^{1/\gamma} \quad (۲)$$

که در آن $\gamma = \sum_{n=1}^{n} W_i$ و W_i: وزن پارامتر iام، n: تعداد پارامترها، I_i: مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی است (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).

جهت هم مقیاس سازی، رتبه شاخص هر پارامتر بر اساس مقدار کیفی آن بین ۱ تا ۱۰۰ طبق منحنی‌های مربوط به مدل شاخص رتبه‌بندی می‌شوند (رتبه ۱۰۰ باکیفیت عالی، در حالیکه رتبه ۱ بدترین کیفیت بر اساس آن پارامتر مشخص می‌شود). سپس از میانگین هندسی رتبه پارامترها بر اساس وزنی که به هر یک از آن‌ها تعلق می‌گیرد شاخص کیفیت آب محاسبه می‌شود. از ویژگی این روش عدم محدودیت در استفاده از تمامی پارامترهای آن می‌باشد.

منطق فازی[1]

منطق فازی، توسعه‌ای از منطق بولی، توسط لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ بر پایه نظریه مجموعه‌های فازی ارائه شد. منطق فازی ابزاری کارآمد در مواجهه با ابهام و عدم قطعیت به شمار می‌رود. کاربرد منطق فازی در تحلیل مسائل پیچیده زیست‌محیطی که تحت تأثیر عوامل متعدد و نامعین قرار دارند، به‌طور گسترده‌ای موردتوجه قرارگرفته است. سیستم استنتاج فازی (FIS) با استفاده از قوانین «اگر–آنگاه» فازی، روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را مدل‌سازی می‌کند. این سیستم، شامل سه بخش اصلی است: توابع عضویت، قوانین فازی و فازی سازی و فازی زدایی. سیستم استنتاج فازی، باقابلیت شبیه‌سازی استدلال انسانی، در مقایسه با روش‌های تحلیلی سنتی، انعطاف‌پذیری و کارایی بیشتری را در مواجهه با مسائل پیچیده از خود نشان می‌دهد (شکل ۲).

توابع عضویت[2]

توابع عضویت هر عضو از x را به درجه‌ای از عضویت (و یا مقدار عضویت) که یک مقدار بین ۰ و ۱ است مرتبط می‌کند. بنابراین کلیهٔ توابعی که بتوانند مقادیر x را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و خروجی در فاصلهٔ $[1,0]$ تولید کنند، می‌توانند به‌عنوان توابع عضویت استفاده شوند (ره پو و همکاران، ۱۳۹۷). اگر فرض کنیم عناصر جهان گفتمان[3] $x_1 (X)$ است، سپس مجموعه فازی $A \subset X$ طبق رابطه (۳) نام‌گذاری می‌شوند.

$$A = \{(x_1, \mu A(x)) / x \in X\}, 0 \le \mu A(x) = 1 \quad (۳)$$

که $\mu A(x)$ یک درجه عضویت بین ۰ و ۱ است. ازنظر زبانشناسی، $x1$ عضوی از A است، مرتبط با $\mu A(x)$، توابع عضویت دارای اشکال مختلفی مانند مثلثی، ذوزنقه‌ای و گوسی هستند (غریبی و همکاران، ۱۳۹۱). در شکل ۳ تابع عضویت مثلثی را می‌توان مشاهده نمود.

مجموعه‌ی فازی برخلاف مجموعه‌های سنتی یادشده به هر عضو درجه‌ای از عضویت را به مجموعه تخصیص می‌دهد.. اگر X را مجموعه‌ای از X ها در نظر بگیریم آنگاه مجموعه‌ی فازی A در X به‌صورت مجموعه‌ای از زوج‌های مرتب طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود :

$$A = \{(x, \mu - A(x)) \; x \in X\} \quad (۴)$$

که $\mu _ A(x)$ تحت عنوان تابع عضویت مجموعه فازی A شناخته می‌شود.

تنظیم قوانین فازی[4]

در منطق فازی، برای توصیف روابط بین متغیرهای ورودی و متغیرهای خروجی از قوانین «اگر – آنگاه» *(IF-THEN)* و از عملگرهای مجموعه فازی استفاده می‌شود. قواعد فازی به‌صورت مجموعه‌ای از گزاره‌های زبانی، که توضیح می‌دهند چگونه یک سیستم استنتاج فازی باید در مورد طبقه‌بندی یک ورودی یا کنترل یک خروجی تصمیم بگیرد، بیان می‌شود و اصولاً به شکل رابطه (۵) نوشته می‌شوند.

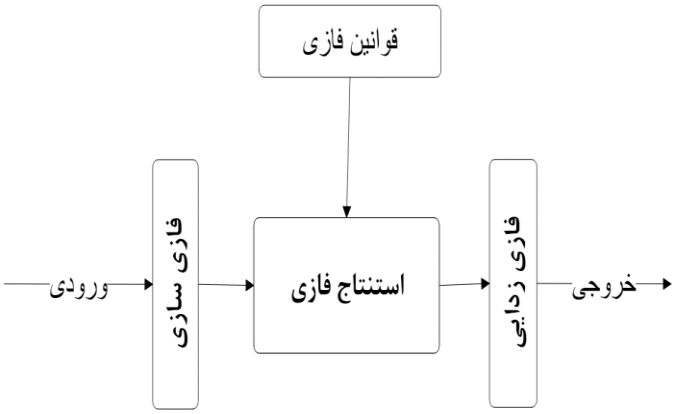
$$Ri: \text{IF } x \text{ is } Ai \text{ and/or } y \text{ is } Bi \text{ THEN } z \text{ is } Ci \quad (۵)$$

که x و y متغیرهای ورودی و z متغیر خروجی هستند. Ai، Bi و Ci به ترتیب مقادیر زبانی برای متغیرهای x، y و z هستند.

[1] Fuzzy Logic
[2] Membership Function
[3] Universe of discourse
[4] Fuzzy Rules

جدول۱- توصيف مقدار شاخص‌های کيفی (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰)

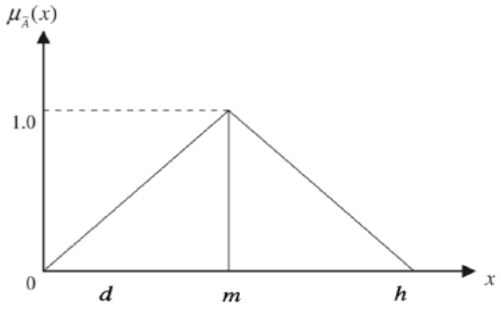
مقدار شاخص	توصيف	مقدار شاخص	توصيف
کمتر از ۱۵	بسيار بد	۷۳ – ۵۵/۱	نسبتاً خوب
۱۵ –۲۹/۹	بد	۸۵ – ۷۳/۱	خوب
۳۰ – ۴۴/۹	نسبتاً بد	بيشتر از ۸۵	بسيار خوب
۴۵ – ۵۵	متوسط		



شکل ۲- دياگرام کلی سيستم استنتاج فازی

جدول۲- پارامترهای شاخص $IRWQI_{sc}$ و وزن‌های آن‌ها (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰)

پارامتر	نماد	واحد	وزن	پارامتر	نماد	واحد	وزن
کليفرم مدفوعی	FC	(MPN/100m)	۰,۱۴	اکسيژن خواهی شيميايی	COD	(ميلی‌گرم بر ليتر)	۰/۰۹۳
اکسيژن موردنياز بيوشيميايی	BOD	(ميلی‌گرم بر ليتر)	۰/۱۱۷	آمونيوم	NH_4^+	(مجموع آمونيوم)	۰/۰۹۰
نيترات	NO_3^-	(ميلی‌گرم بر ليتر)	۰/۱۰۸	فسفات	PO_4	(ميلی‌گرم بر ليتر)	۰/۰۸۷
اکسيژن محلول	DO	(درصد اشباع)	۰/۰۹۷	کدورت	TU	(NTU)	۰/۰۶۳
هدايت الکتريکی	EC	(ميکرو زيمنس بر سانتی‌متر)	۰/۰۹۶	سختی کل	TH	(ميلی‌گرم بر ليتر کربنات کلسيم)	۰/۰۵۹
PH		(واحد استاندارد)	۰/۰۵۱				



شکل ۳- تابع عضويت مثلثی (Ortega و همکاران، ۲۰۲۰)

در مدل‌سازی اين پژوهش،۲۰ قانون فازی بر پايه علم شيمی آب و مباحث هيدرولوژی با تأکيد بر وزن بالاتر پارامترهای حساس (NO_3^- و $DO\%$) به‌طوری‌که اين قوانين باهمديگه همپوشانی داشته باشند و همچنين بهينه و هوشمند باشند، تنظيم و طراحی گرديد. اين

قوانین به بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای شیمیایی و فیزیکی نظیر نیترات (NO_3^-)، اکسیژن محلول ($DO\%$)، آمونیوم (NH_4^+)، فسفات (PO_4)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل (TDS) و (PH) بر کیفیت کلی آب می‌پردازد. مدل ارائه‌شده، وضعیت "خیلی خوب" را در صورت مطلوبیت هم‌زمان تمام پارامترهای ذکرشده پیش‌بینی می‌کند. در مقابل، وجود سطوح "ضعیف" آمونیوم، فسفات و اکسیژن محلول، به‌تنهایی، نشانگر کیفیت "خیلی ضعیف" آب است. همچنین، ارزیابی "نسبتاً خوب" برای نیترات، اکسیژن محلول و PH منجر به نتیجه "نسبتاً خوب" در ارزیابی کلی می‌شود. لازم به ذکر است که وجود حداقل سه پارامتر در وضعیت "خیلی ضعیف"، کیفیت آب را به‌طورکلی "خیلی ضعیف" طبقه‌بندی می‌کند. به‌عنوان قواعد پوششی، درصورتی‌که تمامی پارامترها در سطح "متوسط" باشند، خروجی کلی "متوسط" خواهد بود؛ و اگر تمامی پارامترها در وضعیت "ضعیف" قرار گیرند، کیفیت آب به‌طورکلی "ضعیف" ارزیابی می‌شود. این رویکرد جامع، امکان ارزیابی دقیق و چندوجهی کیفیت آب را فراهم می‌آورد.

پیاده‌سازی سیستم فازی با استفاده از سیستم استنتاج فازی سوگنو [1]

برای افزایش دقت در ارزیابی کیفیت آب و در نظر گرفتن کامل وزن پارامترها، از سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو استفاده‌شده است. در این سیستم، برای پیاده‌سازی خروجی وزن هر پارامتر به‌طور مستقیم در مقدار خروجی ضرب می‌گردد که این رویکرد دقت در انجام محاسبات را افزایش داده و تأثیر وزن هر پارامتر را در تعیین مقدار نهایی شاخص نشان می‌دهد ازاین‌رو این دلیل اصلی استفاده از سیستم سوگنو برای تعیین مقدار نهایی کیفیت آب است. هر پارامتر ورودی (شامل $NO_3^-, DO\%, EC, NH_4^+, PO_4, TH, PH$) و یک خروجی نهایی ($Quality$) یک مجموعه فازی با هفت تابع داشتند. همچنین، برای سادگی و شفافیت، در این مطالعه یک تابع خروجی مشترک به شکل میانگین وزنی همه ورودی‌ها به‌کاررفته (رابطه ۶) که رابطه کلی سیستم سوگنو را برای محاسبه نهایی خروجی مدل به‌منظور تعیین کیفیت آب بیان می‌کند.

$$Q=(0.108(NO3)+0.097(DO)+0.096(EC)+0.090(NH4)+0.087(PO4)+0.059(TDS)+0.051(PH))/0.588 \quad (۵)$$

که $\sum wi = 0.588$، مجموع وزن تمامی پارامترهای موجود، درنتیجه، برای هر نمونه یک مقدار عددی $Q \in [0,100]$، به دست آمد.

طراحی سیستم در محیط نرم‌افزار و زبان برنامه‌نویسی Python

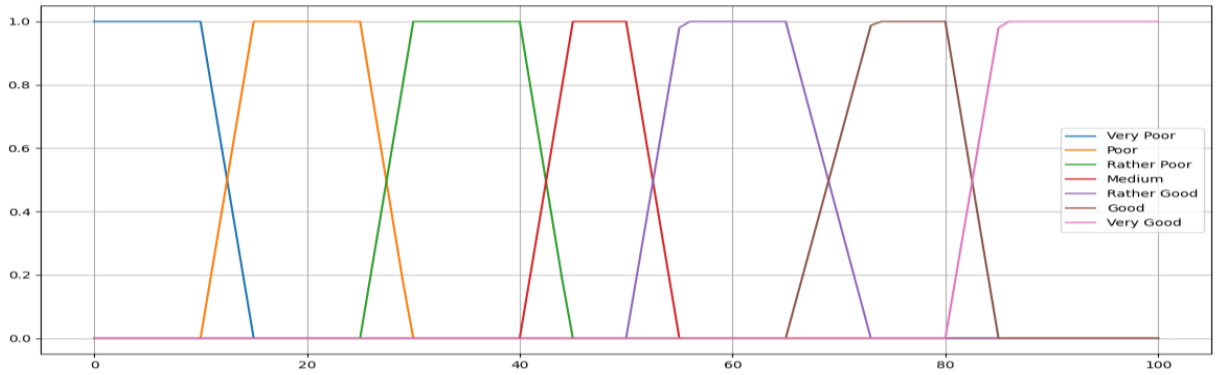
در این پژوهش برای ساخت سیستم فازی، از زبان برنامه‌نویسی پایتون (نسخه ۳,۱۳,۳) و کتابخانه های "pandas" (برای پردازش داده‌ها)، "numpy" (محاسبات عددی)، " scikit-fuzzy" (منطق فازی و مدل Sugeno)، "matplotlib" (رسم نمودار توابع عضویت) استفاده و سیستم فازی Sugeno، طراحی شد. این فرآیند شامل تعریف متغیرهای ورودی و خروجی با توابع عضویت ذوزنقه‌ای، تدوین و اعمال قواعد فازی"IF-THEN" ، و طراحی و شبیه‌سازی مدل کنترل فازی بود. پس از نرمال‌سازی داده‌ها، خروجی سیستم برای هر ردیف داده با استفاده از روش استنتاج Sugeno محاسبه و ذخیره گردید. برای هر ورودی و خروجی، ۷ تابع عضویت ذوزنقه‌ای (Trapezoidal) تعریف شد که مطابق طبقات شاخص IRWQI روی دامنه [0,100] بودند (شکل ۴).

در این پژوهش برای تعیین بهترین توزیع آماری در برازش داده‌های کیفی آب در هر ایستگاه به‌منظور آنالیز دقیق‌تر داده‌ها، از دو روش مقایسه‌ای آماری زیر استفاده شد.

آزمون *KS* (*Kolmogorov–Smirnov*) و مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده (*RSS*)

برای بررسی و انتخاب بهترین توزیع آماری از شاخص KS و RSS استفاده شد. شاخص KS میزان اختلاف بین تابع توزیع تجربی و تابع توزیع نظری را نشان می‌دهد و شاخص RSS خطای برازش را با لحاظ کردن تفاضل مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد و هر چه مقدار این شاخص‌ها کمتر باشد، توزیع آماری موردنظر برای داده‌های موجود مناسب‌تر است.

[1] Fuzzy Inference System Sugeno



شکل ٤- تابع عضویت ذوزنقه‌ای برای ورودی‌ها و خروجی مدل

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از ارزیابی نهایی با استفاده از روش فازی و همچنین با استفاده از روش غیر فازی (شاخص *IRWQI*) درروند یابی تغییرات کمی و کیفی آب در حوزه آبخیز گرگان رود در ایستگاه‌های زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای در ماه‌های نمونه‌برداری مختلف در تشریح شده است. روش غیر فازی (ارزیابی با استفاده از قوانین شاخص *IRWQI*) در ایستگاه‌های زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای به ترتیب در شکل (۵) و همچنین، ارزیابی خروجی‌های روش فازی در شکل (۶)، نمایش داده‌شده است.

ایستگاه زرین گل، روش غیر فازی

تحلیل داده‌های حاصل از شاخص کیفیت آب *IRWQI* در ایستگاه زرین گل (شکل ۵، الف)، تغییرات قابل‌توجهی را در بازه زمانی آبان تا اردیبهشت نشان می‌دهد. در ابتدای دوره نمونه‌برداری، یعنی از ۱۵ آبان تا ۱ آذر، مقدار شاخص بین ۶۱/۷۷ تا ۶۳/۷۱ نوسان داشت. کمترین مقدار ثبت‌شده برای کیفیت آب در این ایستگاه، ۶۱/۰۸ بود که در تاریخ ۱ دی مشاهده شد. از ابتدای بهمن‌ماه، شاخص *IRWQI* روند صعودی محسوسی را آغاز کرد و از ۶۲/۲۹ به اوج خود یعنی ۷۰/۵۵ در ۱ فروردین رسید. این افزایش می‌تواند نشان‌دهنده بهبود کیفیت آب در این دوره باشد. بااین‌حال، پس‌ازاین اوج، یک کاهش ناگهانی تا ۶۲/۴۵ در ۱ اردیبهشت رخ داد اما این افت موقتی بود و شاخص مجدداً تا ۶۵/۵ در ۱۵ اردیبهشت بهبود یافت.

ایستگاه رامیان، روش غیر فازی

بررسی روند تغییرات خروجی در ایستگاه رامیان نیز همانند ایستگاه زرین گل دارای نوسانات قابل‌توجهی است (شکل ۵، ب). شاخص از ۸۰/۳ آغازشده و پس از افتی اولیه به ۷۷/۴۹ (۱۵ آبان)، با روند صعودی به مقدار ۸۵/۷۲ (۱۵ دی) و ۸۶/۶۷ (۱ اسفند) رسید. به دنبال آن، با کاهشی شدید روبرو شد و شاخص به مقدار ۷۶/۷۲ (۱۵ اسفند) و ۷۷/۲ (۱ فروردین) رسید. درنهایت، با بهبودی نسبی به میزان ۸۳/۱۱ (۱ اردیبهشت) و در پایان دوره نمونه‌برداری میزان خروجی نهایی کیفیت آب ۸۱/۹ (۱۵ اردیبهشت) بود.

ایستگاه گالیکش، روش غیر فازی

نمودار روند تغییرات درروش غیر فازی گالیکش برای بازه زمانی موردبررسی (آبان تا اردیبهشت‌ماه)، نشانگر نوسانات چشم‌گیری است (شکل ۵، پ). در آغاز دوره، مقدار شاخص نسبتاً پایدار و در محدوده ۸۳ تا ۸۳/۶ قرار داشت. بااین‌حال در دی‌ماه با یک کاهش شدید مواجه شده است که طی آن مقدار خروجی شاخص به کمترین مقدار خود یعنی ۵۹/۴۶ (در ۱ دی‌ماه) رسید که پایین‌ترین مقدار خروجی در بین ایستگاه‌های موردبررسی (با استفاده از روش غیر فازی (شاخص *IRWQI*) است. در ادامه بررسی روند تغییرات پس‌ازاین کاهش ناگهانی، روند بهبود شاخص به‌سرعت آغاز می‌شود و مقادیر آن به سطح پیشین بازمی‌گردد و به بیشترین مقدار خود در این ایستگاه (۸۷/۳۷) می‌رسد که در فروردین‌ماه است به‌علاوه در مقایسه با حداقل مقدار دی‌ماه، نشان‌دهنده بازیابی سریع کیفیت آب است. در ادامه و در ماه‌های پایانی دوره نمونه‌برداری نوسانات ملایمی مشاهده می‌شود که مقدار شاخص اغلب در بازه عددی ۷۹/۹۳ تا ۸۷/۳۷ دچار تغییرات بود. درنهایت در پانزدهم اردیبهشت‌ماه مقدار شاخص ۸۶/۷۵ بود که بیانگر تثبیت نسبی و مطلوب شاخص در پایان بررسی روند تغییرات است.

ایستگاه چهل چای، روش غیر فازی

روند یابی روش غیر فازی در ایستگاه چهل چای از آبان تا اردیبهشت، تغییرات قابل‌توجهی را گزارش می‌دهد (شکل ۵، ت). در آبان ماه مقدار شاخص با عدد ۸۰/۸۶ آغاز و پس‌ازآن دچار افت اولیه شد که مقدار شاخص به ۷۶/۷۱ در ۱۵ آبان رسید. در ادامه خروجی شاخص روند صعودی پایداری را گزارش داد که در ۱۵ بهمن به اوج اولیه خود یعنی ۸۴/۳۹ رسید که بیانگر بازیابی و تثبیت نسبی می‌باشد. بااین‌حال، در نیمه اول اسفند با افت قابل‌توجهی به ۷۱/۷۶ در ۱۵ اسفند مواجه شد. این کاهش شدید، مشابه الگوهای مشاهده‌شده در ایستگاه گالیکش، می‌تواند ناشی از عوامل محیطی باشد. پس‌ازاین افت، به‌سرعت شاهد بهبود شاخص در ۱ فروردین به مقدار ۸۴/۱ بودیم. درنهایت شاخص با تثبیت نسبی در سطوح مطلوب‌تر به مقدار ۸۳/۵۴ در ۱۵ اردیبهشت رسید.

این بخش پژوهش به تحلیل روند تغییرات خروجی کیفیت آب با استفاده از روش فازی (منطق و قوانین و سیستم‌های فازی) به ترتیب در چهار ایستگاه (زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای) در بازه زمانی آبان تا اردیبهشت‌ماه می‌پردازد.



شکل۵- نتایج حاصل از ارزیابی نهایی ایستگاه‌ها با استفاده از روش غیر فازی

ایستگاه زرین گل، روش فازی

روند تغییرات نمودار خروجی با استفاده از روش فازی در ایستگاه زرین گل نشانگر فراز و نشیب‌های متعددی است (شکل۶، ث).

خروجی فازی در نمونه‌برداری نخست (۱ آبان) با مقدار ۷۳/۴ آغاز شد و پس از روند نزولی و صعودی کوچک از ۷۱ در ۱۵ آبان و تا ۱۵ آذر به ۷۲/۵ افزایش یافت. در ۱ دی مشاهده می‌شود که خروجی به

مقدار حدود ۷۰/۱۶ رسیده و در ادامه شامل یک‌روند صعودی بوده و شاخص در ۱۵ بهمن به اوج یعنی مقدار ۷۶/۵ می‌رسد. پس‌ازاین نقطه اوج، خروجی افت تدریجی را تجربه می‌کند و در ۱ فروردین به حدود ۷۴ کاهش می‌یابد. درنهایت میزان خروجی در ۱۵ اردیبهشت به حدود ۷۵/۵ می‌رسد. این ایستگاه باوجود نوسانات، اوج و فرودهای مشخصی را تجربه کرده که نیاز به تحلیل عوامل محیطی مؤثر بر آن دارد.

ایستگاه رامیان، روش فازی

در ایستگاه رامیان شاهد الگوی نوسانی نسبتاً پیچیده‌تری هستیم (شکل۶ ج). شاخص در آبان ماه حدود ۸۰/۵ آغازشده و در ۱۵ آبان به حدود ۷۹ کاهش می‌یابد. سپس در یک فرایند روند صعودی چشمگیری تا ۱۵ بهمن مشاهده می‌شود که شاخص به مقدار ۸۷ می‌رسد. پس‌ازاین نقطه اوج، یک افت قابل‌توجه به حدود ۸۱ در ۱۵ اسفند رخ می‌دهد. در ۱ فروردین، شاخص با یک افت شدیدتر به حدود ۷۸/۵ می‌رسد که کمترین مقدار در این ایستگاه است. بااین‌حال، در ماه‌های پایانی دوره، شاخص روند بازیابی را طی می‌کند و در ۱۵ اردیبهشت به حدود ۸۳/۵ می‌رسد. نوسانات شدید در این ایستگاه، به‌ویژه افت ناگهانی در اسفند و فروردین‌ماه، می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت بالای آن به تغییرات محیطی خاص و علل مختلف باشد.

ایستگاه گالیکش، روش فازی

در ایستگاه گالیکش یکی از چشمگیرترین الگوهای افت مقدار خروجی در میان ایستگاه‌های موردبررسی دیده می‌شود (شکل۶ چ). شاخص در آبان ماه حدود ۸۳/۵ آغازشده و در ۱۵ آبان به حدود ۸۲/۵ کاهش می‌یابد. در ادامه مقدار خروجی روش فازی تا ۱۵ آذر به حدود ۸۳/۵ بازمی‌گردد، اما در ۱ دی یک‌روند نزولی باعث می‌شود که مقدار خروجی حدود عدد ۶۹ را تجربه کند که پایین‌ترین مقدار مشاهده‌شده در کل ایستگاه‌ها (در مقایسه با خروجی‌های روش فازی) می‌باشد. پس‌ازاین افت شدید، شاخص روند بازیابی سریعی را آغاز کرده و در ۱۵ بهمن به حدود ۸۴/۵ می‌رسد. این روند افزایشی ادامه یافته و در ۱۵ اسفند به اوج ۸۸/۵ می‌رسد. در ۱ فروردین شاخص به حدود ۸۴ کاهش می‌یابد، اما درنهایت با نوسانات ملایم در اردیبهشت‌ماه، در ۱۵ اردیبهشت به حدود ۸۷ می‌رسد. افت شدید و بازیابی متعاقب آن در گالیکش، نیازمند بررسی دقیق عوامل محرک این تغییرات است.

ایستگاه چهل چای، روش فازی

ایستگاه چهل چای نیز نوسانات قابل‌توجهی را نشان می‌دهد که با الگوی کلی ایستگاه گالیکش در بخش‌هایی شباهت دارد (شکل۶ ح). خروجی روش فازی ایستگاه چهل چای در آبان ماه با مقدار ۸۲ آغازشده و در ۱۵ آبان به حدود ۷۸/۵ کاهش می‌یابد. سپس با شروع یک‌روند صعودی در ۱۵ بهمن به اوج ۸۶ می‌رسد. پس‌ازاین اوج، یک افت چشمگیر در ۱۵ اسفند به حدود ۷۴ مشاهده می‌شود. هرچند این افت به‌شدت روند نزولی در ایستگاه گالیکش نمی‌باشد اما قابل‌توجه است و بیانگر بررسی‌های لازم برای یافتن عوامل دخیل در این افت ناگهانی می‌باشد. بااین‌حال، شاخص به‌سرعت روند بازیابی را طی کرده و در ۱ فروردین به حدود ۸۴/۵ افزایش می‌یابد و در ادامه، در ۱۵ فروردین به حدود ۸۱/۵ کاهش می‌یابد. درنهایت در ۱۵ اردیبهشت مقدار خروجی روش فازی در این ایستگاه به حدود ۸۴/۵ رسیده است که به نظر می‌رسد نوسانات قابل‌توجه و بازیابی سریع پس از افت، از ویژگی‌های بارز این ایستگاه است.

جدول (۳) به مقایسه نتایج آنالیز آماری عملکرد روش فازی در مقایسه با روش غیر فازی را در چهار ایستگاه در۱۲ زمان نمونه‌برداری متفاوت می‌پردازد. در هر ایستگاه، مقادیر میانگین، واریانس، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای هر دو روش محاسبه‌شده است. بر اساس مقایسه‌ها، پایین‌ترین مقدار میانگین خروجی داده‌ها در بین تمامی ایستگاه‌ها مربوط به ایستگاه زرین گل است. ازاین‌رو می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این ایستگاه باعث کاهش میانگین کل در بین تمامی داده‌ها شده است که بیانگر کیفیت آب پایین‌تر این رودخانه در مقایسه با رودخانه‌های دیگر است. بالاترین میزان انحراف معیار در ایستگاه گالیکش با روش غیر فازی است، که فاصله‌ی زیادی با سایر ایستگاه‌ها دارد و نشان‌دهنده‌ی پراکندگی زیاد داده‌ها در این ایستگاه است بدین معنی که مقادیر اندازه‌گیری‌شده در این ایستگاه ثبات کمتری داشته‌اند و دچار نوسان‌های شدید بوده‌اند. اما مقدار انحراف معیار برای خروجی‌های روش فازی اختلاف زیادی با روش غیر فازی در این ایستگاه داشت به نحوی بیانگر این موضوع است که روش فازی در برآورد میزان خروجی کیفیت آب برای ایستگاه گالیکش نه‌تنها نوسانات شدید

داده‌ها را کنترل کرده، بلکه نسبت به روش غیر فازی توانسته تحلیل کمی دقیق‌تر و باثبات‌تری ارائه دهد. همچنین اختلاف قابل‌توجه بین مقدار ضرایب تغییرات درروش فازی (۰/۰۶۳۶) و روش غیر فازی (۰/۰۹۱۹) برای ایستگاه گالیکش نشان‌دهنده عملکرد پایدارتر و منسجم‌تر روش فازی در مقایسه با روش غیر فازی است. بر این اساس روش فازی توانسته در رفع ابهام و در ارائه خروجی هوشمندانه‌تر عمل کند. بر اساس این نتایج و مقایسه‌های آماری یکی از نقاط قوت روش فازی در تعیین کیفیت آب، تحلیل داده‌های پراکنده در شرایط پیچیده محیطی و ناپایدار است. به‌علاوه، روش فازی در بیشتر ایستگاه‌ها میانگین بالاتری نسبت به روش غیر فازی دارد که نشان‌دهنده‌ی ارزیابی محتاطانه‌تر در برآورد داده‌های خروجی ایستگاه‌ها نسبت به روش قطعی (غیر فازی) است.



شکل ٦- نتایج حاصل از ارزیابی نهایی ایستگاه‌ها با استفاده از روش فازی

جدول ۳- خلاصه‌ی آماری عملکرد روش فازی و غیر فازی

ایستگاه	زرین گل		رامیان		گالیکش		چهل چای	
روش	غیر فازی	فازی	غیر فازی	فازی	غیر فازی	فازی	غیر فازی	فازی
میانگین	۶۴/۹۱	۷۳/۶۶	۸۱/۳۳	۸۲/۸۳	۸۲/۰۸	۸۳/۷۸	۸۰/۷۷	۸۲/۰۳
واریانس	۱۲/۲۶	۴/۲۷	۱۳/۵۱	۱۰/۵۰	۵۸/۶۳	۲۸/۴۴	۱۳/۵۴	۱۱/۵۶
انحراف معیار	۳/۵۰	۲/۰۶	۳/۶۷	۳/۲۴	۷/۶۶	۵/۳۳	۳/۶۸	۳/۴
ضریب تغییرات	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴۵۲	۰/۰۳۹	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۴۵۶	۰/۰۴۱۴

همچنین، در اغلب موارد واریانس و انحراف معیار درروش فازی کمتر از غیر فازی است که بیانگر ثبات بیشتر و پراکندگی کمتر نتایج این روش است. به‌علاوه، ضریب تغییرات نیز معمولاً درروش فازی پایین‌تر است که نشان‌دهنده نوسان کمتر داده‌ها و توزیع متعادل‌تر داده‌ها در این روش است. درنتیجه، بر اساس یافته‌ها و نتایج می‌توان گزارش داد که روش فازی نسبت به غیر فازی عملکرد آماری پایدارتر و دقیق‌تری از خود نشان می‌دهد.

در جدول (۴) عملکرد روش فازی و روش غیر فازی در ارزیابی کیفیت آب ازنظر شاخص‌های آماری موردبررسی قرارگرفته است. نتایج نشان داد که روش فازی دارای میانگین بالاتری نسبت به روش غیر فازی (۸۰/۵۸ درصد در مقابل ۷۷/۳۱ درصد) بوده و همچنین انحراف معیار کمتری نسبت به روش غیر فازی (۵/۳۸ در مقابل ۸/۵۷) دارد که این موضوع بیانگر دقت بالاتر در خروجی‌های روش فازی است. علاوه بر این، چولگی داده‌ها درروش فازی (۰/۵ −) و درروش غیر فازی (۰/۸۱ −) نشان می‌دهد هر دو توزیع دارای کشیدگی منفی هستند، اما توزیع خروجی‌های روش فازی به حالت نرمال نزدیک‌تر بوده و تعادل بیشتری دارد بنابراین روش فازی در تحلیل کیفیت آب نسبت به روش غیر فازی عملکرد آماری بهتری از خود نشان داده و در شرایط عدم قطعیت قابل‌اعتمادتر است. علاوه بر این، نتایج مقایسه‌های آماری نشان داد که درروش فازی ۶۲/۵ درصد و درروش غیر فازی ۶۴/۵۸ درصد از داده‌ها بالاتر از مقدار میانگین قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که در اغلب موارد، مقادیر شاخص کیفیت آب بالاتر از عدد ۵۰ هستند؛ عددی که به‌طورمعمول مرز بین کیفیت متوسط و خوب تلقی می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب رودخانه‌ها در بیشتر موارد در محدوده‌ی «خوب» قرار دارد و بررسی آماری روند تغییرات داده‌ها بیانگر تمایل رودخانه به باقی‌مانده در شرایط کیفی مطلوب است. به‌علاوه، ضریب تغییرات درروش فازی (۰/۰۶۶۷) به‌طور قابل‌توجهی کمتر از ضریب تغییرات (۰/۱۱۰۷) درروش غیر فازی است. این اختلاف نشان می‌دهد که روش فازی نتایج دقیق‌تر و پایدارتری ارائه می‌دهد، زیرا ضریب تغییرات پایین‌تر به معنی کاهش نوسانات و پراکندگی داده‌ها است. به همین دلیل، می‌توان اظهارنظر کرد که روش فازی عدم قطعیت‌ها و ناهمگنی داده‌ها را بهتر مدل‌سازی می‌کند که این سبب ارائه خروجی منظم‌تر و محتاطانه‌تر می‌شود. بنابراین، استفاده از روش فازی به دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالاتر، برای تحلیل داده‌ها یا پیش‌بینی‌ها مناسب‌تر و مؤثرتر است.

جدول ٤- تحلیل‌ها و مقایسه‌های آماری بین مقادیر خروجی روش‌های فازی و غیر فازی($IRWQI_{SC}$)

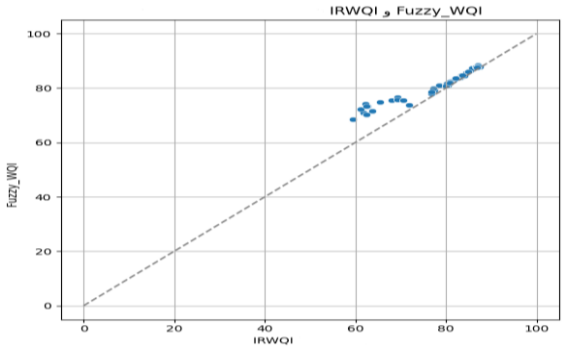
روش	میانگین	انحراف معیار	چولگی	درصد بالاتر از میانگین	درصد پایین‌تر از میانگین	واریانس	ضریب تغییرات
فازی	۸۰/۵۸	۵/۳۸	−۰/۵	٪۶۲/۵۰	٪۳۷/۵۰	۲۸/۹۰۶۵	۰/۰۶۶۷
غیر فازی	۷۷/۳۱	۸/۵۷	−۰/۸۱	٪۶۴/۵۸	٪۳۵/۴۲	۷۳/۳۴۵۲	۰/۱۱۰۷

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۵) از مجموع ۵۷۶ نمونه موردبررسی، حدود ۷۵/۵ درصد طبقه‌بندی‌های به‌دست‌آمده از روش فازی با نتایج روش IRWQI تطابق یکسانی داشتند. به‌علاوه، بررسی جزئی‌تر نشان می‌دهد که روش فازی در اغلب موارد به‌ویژه در طبقه‌بندی توصیفی "متوسط" و بخشی از نمونه‌هایی با طبقه‌بندی "خوب"، گرایش به ارتقای سطح کیفی آب داشته و این نمونه‌ها را در سطوح بالاتری (در کلاس خوب یا بسیار خوب) طبقه‌بندی کرده است. در مقابل، در بخشی از نمونه‌های کلاس "بسیار خوب"، رویکرد فازی

بااحتیاط بیشتری عمل کرده و آن‌ها را در سطح پایین‌تر (خوب) قرار داده است. این موضوع بیانگر انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم فازی در مقایسه با شاخص IRWQI است، به‌گونه‌ای که این روش می‌تواند در شرایط مرزی با حساسیت بیشتری تغییرات پارامترها را منعکس نموده و ارزیابی دقیق‌تری از کیفیت آب ارائه دهد. همچنین، شکل (۷) نمودار پراکندگی داده‌های خروجی مربوط بهروش‌های تعیین کیفیت آب فازی در مقابل غیر فازی (IRWQI) را نشان می‌دهد که به‌منظور تحلیل و بررسی دقیق‌تر آن، از روش مقایسه‌ای جیل جانویک استفاده شد (قاضیانی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نورکی و هوشمند، ۱۳۹۹). نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که داده‌ها به روش فازی نزدیک‌تر و نشان‌دهنده تمایل قابل‌ملاحظه‌ای به هم‌راستایی با مقادیر حاصل از خروجی روش فازی می‌باشند. این بررسی بیانگر اهمیت وبرتری بالای روش‌های فازی در تعیین کیفیت آب و همچنین پردازش عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های کیفیت آب و ارائه خروجی‌های دقیق‌تر است. درنتیجه، کارایی بالای رویکرد فازی در ارزیابی کیفیت آب مورد تأیید است که می‌تواند مبنایی برای انتخاب این روش به‌عنوان معیاری برای استفاده در مطالعات آتی باشد. در همین راستا، مطالعه‌ی عبیدی و همکاران (۲۰۲۴)، برتری روش فازی در ارزیابی کیفیت آب نسبت به روش‌های مرسوم را تائید کرده‌اند که نشان‌دهنده کارایی بالای این رویکرد بوده و آن را به‌عنوان معیاری مناسب برای استفاده در مطالعات آینده معرفی می‌کند.

جدول ۵- میزان تطابق و اختلاف طبقه‌بندی کیفیت آب بین روش فازی و غیر فازی (IRWQI)

طبقه‌بندی خروجی شاخص IRWQI	خروجی روش فازی		درصد تطابق بین دو روش
	خوب	بسیار خوب	
متوسط	۱	۱۱	
خوب	۱۶۳	۷۷	۷۵/۵ درصد
بسیار خوب	۵۲	۲۷۲	



شکل ۷- مقایسه مقادیر کیفیت آب درروش شاخص ایرانی و روش فازی

جدول(۶) داده‌های حاصل از آزمون برازش توزیع‌های آماری مختلف به مقادیر خروجی روش فازی در چهار ایستگاه زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای را نشان می‌دهد. ارزیابی برازش توزیع‌های آماری برای داده‌ها ازجمله توزیع نرمال، لگ‌نرمال، گاما، ویبول و پیرسون۳ صورت گرفت. در این پژوهش به‌منظور پیش‌گیری و مدیریت تغییرات احتمالی در پارامترهای کیفی آب ملزم به بهره‌گیری از توزیع‌های آماری شدیم. با استفاده از این توزیع‌ها می‌توان روند و نوسانات متغیرهای مؤثر بر کیفیت آب را به‌صورت کمّی تحلیل کرده و بر اساس فرضیات و داده‌های موجود، برآوردی از وضعیت کیفیت آب در سال‌های آینده و در مطالعات آتی ارائه داد. تفاوت در طبقه‌بندی کیفی آب بین دو روش (فازی و غیر فازی) در حدود ۲۴/۵ درصد موارد، نشان‌دهنده حساسیت بیشتر سیستم فازی به داده‌های مرزی و احتمال شناسایی نقاط بحرانی با اطمینان و دقت بالا است. این ویژگی می‌تواند در تدوین برنامه‌های مدیریتی پیشگیرانه نقش مؤثرتری ایفا کند به طوریکه، ازنظر آماری مقایسه خروجی‌ها با رابطه RSS نشان داد که بهترین توزیع آماری برای

داده‌های فازی در ایستگاه‌های رامیان و زرین گل توزیع پیرسون۳ و برای ایستگاه‌های چهل چای و گالیکش، توزیع گاما می‌باشند (جدول ۶) و همچنین برای تمامی داده‌های خروجی ایستگاه‌ها توزیع گاما به‌عنوان بهترین توزیع آماری انتخاب شد (جدول ۷). نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات کیفیت آب در چهار ایستگاه رودخانه‌های منتهی به حوزه آبخیز گرگان رود(زرین گل، رامیان، گالیکش و چهل چای) با استفاده از روش‌های فازی و غیر فازی نشان داد که کیفیت آب در حوزه آبریز گرگان رود در کلاس‌های نسبتاً خوب، خوب و خیلی خوب ارزیابی و طبقه‌بندی می‌شود. روش فازی، به دلیل استفاده از عدم قطعیت‌ها و فاصله پارامترها از حدود مجاز، دقت و حساسیت بالاتری نسبت به شاخص قطعی IRWQI ارائه داد.

جدول ٦- تحلیل و انتخاب بهترین توزیع آماری بر اساس نرمال‌سازی شاخص‌های KS و RSS در ایستگاه‌ها

ایستگاه	توزیع آماری	KS	RSS	بهترین توزیع
زرین گل	نرمال	۰/۱۵۳۵۹۱۷	۲۸/۴۴	پیرسون۳
	لوگ نرمال	۰/۴۷۶۱۶۴۶	۲۸/۹۳	پیرسون۳
	گاما	۰/۱۵۴۴۴۱۶	۲۰/۰۸	پیرسون۳
	ویبول	۰/۱۵۳۶۲۲۳	۷۲/۲۱	پیرسون۳
	پیرسون۳	۰/۱۳۰۰۶۰۹	۲۰/۰۸	پیرسون۳
رامیان	نرمال	۰/۱۴۳۸۵۵۵	۶۸/۰۳	پیرسون۳
	لوگ نرمال	۰/۴۸۰۷۸۰۱	۷۶/۰۴	پیرسون۳
	گاما	۰/۱۲۸۷۸۵	۳۹/۸۶	پیرسون۳
	ویبول	۰/۱۱۴۱۴۳۸	۲۱۰/۱۲	پیرسون۳
	پیرسون۳	۰/۱۱۲۳۴۱۱	۴۱/۲۸	پیرسون۳
گالیکش	نرمال	۰/۲۴۶۴۸۴	۲۶۱/۸	پیرسون۳
	لوگ نرمال	۰/۲۴۶۴۸۴۵	۲۰E+۱	پیرسون۳
	گاما	۰/۲۶۳۵۳۷۹	۱۸۴/۸۲	پیرسون۳
	ویبول	۰/۷۶۸۰۹۳۵	۶۸۰۲	پیرسون۳
	پیرسون۳	۰/۴۲۵۴۳۰۵	۵۰/۰۷	پیرسون۳
چهل چای	نرمال	۰/۱۸۴۲۲۱	۸۶/۳۹	گاما
	لوگ نرمال	۰/۱۸۴۲۲۲۴	۸۶/۳۶	گاما
	گاما	۰/۱۹۷۴۸۲۴	۵۸/۰۴	گاما
	ویبول	۰/۶۵۴۳۶۱۱	۱۶۱۹۷	گاما
	پیرسون۳	۰/۲۰۴۸۹۴۷	۱۰۱/۸	گاما

جدول ۷- بهترین برازش کلی توزیع‌های آماری برای تمامی داده‌های ایستگاه‌ها

توزیع آماری	RSS
نرمال	۱۳۷,۰۳
لوگ نرمال	۱۴۲,۰۲
گاما	۹۹,۶۹
ویبول	۹۸,۵۵
پیرسون۳	۱۵۸,۴۳

در طول دوره آماربرداری ایستگاه چهل چای کیفیت آب عمدتاً در طبقات خوب (۸۳ درصد) و خیلی خوب (۱۶/۷درصد) قرار داشت. این نتایج با نتایج قلی زاده (۱۳۹۹) که کیفیت آب در ایستگاه مذکور را پایین‌تر گزارش داد همخوانی ندارد، ولی بااین‌حال با نتایج آقایی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت داد. در ایستگاه گالیکش کیفیت آب بعضاً در کلاس کیفی نسبتاً خوب (۸/۳ درصد)، غالباً در کلاس خوب (۵۸/۳ درصد)، و خیلی خوب (۳۳/۳ درصد) طبقه‌بندی شد. درحالی‌که گزارش یافته‌های قره‌محمودلو و همکاران (۱۳۹۸) حاکی از آن است که روند کیفیت آب رودخانه گالیکش از بالادست به پایین‌دست به‌صورت کاهشی است بنابراین با یافته‌های پژوهش حاضر مغایرت دارد بطوریکه این تفاوت احتمالاً ناشی از اختلاف در روش‌شناسی یا بازه‌های زمانی نمونه‌برداری است. نتایج این مطالعه برای ایستگاه زرین گل نشان داد که کیفیت آب معمولاً در طبقه خوب قرار داشته است، اما صادقی و همکاران (۱۳۹۴) کیفیت آب در این ایستگاه را به‌طور میانگین در طبقه نسبتاً خوب ارزیابی کرده بودند بنابراین تطابق اندکی بین نتایج دو پژوهش دیده می‌شود؛ این اختلاف ممکن است به دلیل بهبود شرایط محیطی حوزه موردمطالعه در سال‌های اخیر یا تفاوت در دوره‌های مطالعه باشد. در ایستگاه رامیان، کیفیت آب اکثراً در طبقه خوب (۷۵ درصد) و گاهاً در طبقه خیلی خوب (۲۵ درصد) گزارش شد که با یافته‌های حیدریان (۱۳۸۹) همخوانی دارد و نشان‌دهنده پایداری نسبی کیفیت آب در این ایستگاه طی سال‌های گذشته است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف ارائه و ارزیابی عملکرد یک مدل فازی مبتنی بر سیستم استنتاج سوگنو با شاخص قطعی IRWQI، به‌منظور برآورد کیفیت آب حوزه آبریز گرگان رود مقایسه شد. تحلیل‌های دقیق بر روی‌داده‌های جمع‌آوری‌شده از چهار رودخانه اصلی حوزه در بازه زمانی آبان ۱۴۰۱ تا اردیبهشت ۱۴۰۲، نشان داد که کیفیت آب این رودخانه درمجموع در سطحی مطلوب قرار دارد و بیشتر مقدار خروجی مدل برای ارزیابی کیفیت آب در بازه "خوب" تا "بسیار خوب" طبقه‌بندی می‌شود. یافته‌های این پژوهش، برتری رویکرد فازی را در مدیریت عدم قطعیت و افزایش دقت ارزیابی کیفیت آب تأیید می‌کند. مقایسه‌های آماری نشان داد که خروجی مدل فازی دارای میانگین بالاتر (۸۰/۵۸ در برابر ۷۷/۳۱)، انحراف معیار کمتر (۵/۳۸ در برابر ۸/۵۷) و همچنین ضریب تغییرات پایین‌تری (۰/۰۶۶۷ در برابر ۰/۱۱۰۷) است؛ ازاین‌رو، این نتایج صراحتاً بر دقت و انسجام بالای خروجی روش فازی در شرایطی که داده‌ها دارای پراکندگی هستند، دلالت دارد. علاوه بر این، درحالی‌که تطابق ۷۵/۵ درصدی بین دو روش مشاهده شد، ۲۴/۵ درصد عدم تطابق باقی‌مانده عمدتاً در نمونه‌های مرزی رخ داد بنابراین سیستم فازی با حساسیت بیشتری عمل کرد و ارزیابی محتاطانه‌تری از وضعیت آب در این نقاط ارائه داد. این رفتار، به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که دارای نوسانات بالابودند، مانند ایستگاه گالیکش نشان‌دهنده توانایی برتر رویکرد فازی در شناسایی نقاط بحرانی و ارائه برآوردی باثبات و با اطمینان تر است.

برآورد اینکه "توزیع گاما" بهترین برازش را برای داده‌های فازی دارد، یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش است که این نتیجه ظرفیت ارزشمندی برای استفاده در مدل‌های پیش‌بینی روندهای آتی کیفیت آب ایجاد می‌کند و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری در حوزه منابع آب و کشاورزی مورداستفاده متخصصان و محققان قرار گیرد.

درمجموع، شواهد موجود در این پژوهش تأکید می‌کند که منطق فازی نه‌تنها با شاخص‌های قطعی مانند IRWQI سازگاری دارد، بلکه به دلیل برتری در مدیریت عدم قطعیت و ارائه برآوردی منظم‌تر و باثبات‌تر از کیفیت آب، می‌تواند به‌عنوان مکملی قدرتمند یا حتی جایگزینی عملی برای ارزیابی‌ها و مطالعات آتی به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تخصیص بهینه منابع آب مورداستفاده قرار گیرد.

برای انجام این پژوهش تعداد نمونه‌ها محدود و بازه زمانی برای بررسی‌ها و تحلیل‌های آماری کوتاه بود. این محدودیت باعث می‌شود که نتایج به‌راحتی قابل‌تعمیم به شرایط مشابه نباشند ازاین‌رو برای افزایش اعتبار نتایج، انجام مطالعاتی با بازه زمانی طولانی‌تر و تعداد نمونه‌های بیشتر در آینده ضروری می‌باشد. به‌علاوه، این تحقیق تنها در یک حوزه آبریز مشخص انجام‌شده است، درحالی‌که بررسی

هم‌زمان حوزه‌های آبریز دیگر در سراسر کشور می‌تواند به مقایسه و اعتبارسنجی بهتر نتایج کمک کند. در پایان، نتایج و تحلیل‌های این پژوهش می‌تواند برای پیش‌بینی دقیق و تغییرات کیفیت منابع آب سطحی ایران در سال‌های آتی پرکاربرد باشد. همچنین، استفاده از این پیش‌بینی‌ها می‌تواند به تصمیم گیران حوزه آب و کشاورزی کمک کند تا سبب انجام اقدامات مؤثرتری ازجمله تخصیص بهینه منابع آب، پایش مستمر کیفیت آب (به‌ویژه در مواقع بحرانی) شوند. همچنین این رویکرد منجر به مدیریت پایدار و کاهش آسیب‌پذیری در برابر نوسانات کیفی آب خواهد شد.

منابع

آقایی، م. حشمت پور، ع. قره محمود لو، م. و سیدیان، س.م. ۱۳۹۹ . بررسی کیفیت آب رودخانه چهل چای با استفاده از شاخص IRWQIs، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲ (۵): ۱۵۳ – ۱۶۶.

پاشازاده لاله، ز. جعفری، ه. و واعظی هیر، ع. ۱۳۹۹. ارزیابی آلودگی رودخانه آجی‌چای در محدوده دشت تبریز براساس تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های کیفی NSFWQI و .IRWQI . مجله آب و خاک. ۳۴(۶): ۱۲۰۳–۱۲۱۸.

حشمت پور، ع. و سجادی، ج. ۱۴۰۳. بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب کشاورزی در رودخانه گرگان‌رود با استفاده از قوانین فازی. مجله رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست ۳(۲): ۳۸–۵۶.

حیدریان، ا. نیک قوجق، ی. ۱۳۸۹. بررسی کمی و کیفی منابع تأمین آب سد رامیان. مقاله ارائه شده در نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

صادقی، م. بای، ا. بای، ن. سفلایی، ن. مهدی‌نژاد، م. ه. و ملاح، م. ۱۳۹۴. تعیین وضعیت کیفیت آب رودخانه زرین‌گل استان گلستان با کاربرد شاخص کیفی آب (NSFWQI) و شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران (IRWQIsc) . فصلنامه بهداشت در عرصه دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی. ۳(۳): ۲۷–۳۳.

صفاری نیا، ش. عبقری، ه. و عرفانیان، م. ۱۳۹۹. توسعه شاخص فازی کیفیت آب در ارزیابی کیفی آب بالا و پایین‌دست سد مخزنی مهاباد. نشریه مرتع و آبخیزداری. ۷۳(۳): ۵۲۵–۵۴۰.

قاضیانی، س. حشمت پور، ع. فراستی، م. و رستمی، ف. ۱۳۹۹. ارزیابی کیفی رودخانه گرگان‌رود با استفاده از شاخص NSFWQIدر منطقه شهری گنبدکاووس. اکوهیدرولوژی. ۷(۲): ۳۷۲–۳۸۳.

قره محمدلو، م. صیادی، م. قربانی، ف. ۱۳۹۸. بررسی هیدروشیمی آب رودخانه اوغان، استان گلستان. مقاله ارائه شده در دومین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی با محوریت آب، سیل و محیط زیست، گنبدکاووس.

قلی زاده، م. و زیبایی، م. ۱۳۹۹. ارزیابی کیفیت آب رودخانه چهل چای در استان گلستان بر اساس شاخص‌های کیفیNSFWQI ، IRWQISC و .CWQI. مجله دانشگاه علوم پزشکی گرگان. ۲۲(۴): ۱۲۳–۱۳۱.

کارآموز، م. و کراچیان، ر. ۱۳۸۲. برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب. کتاب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

نورکی، ع. و هوشمند، ع. ۱۳۹۹. بررسی روند و الگوی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی آب (مطالعه موردی دشت همدان–بهار). علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۲۲(۷): ۴۱۵–۴۲۸.

ودیعتی، م. نخعی، م. امیری امرایی، و. و میرعربی، ع. ۱۳۹۲. ارزیابی کیفیت آب رود کارون با استفاده از شبیه استنتاج فازی. فصلنامه مهندسی منابع آب. ۶(۱۸): ۳۹–۴۸.

Abidi, B., Gharbi, A., Chkirbene, A. and Guellouz, M. 2024. Evaluation of groundwater quality indices using multi-criteria decision-making techniques and a fuzzy logic model in an irrigated area. Groundwater for Sustainable Development. 25: 101122. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101122.

APHA. 1999. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. Waldorf, Maryland.

Bellini, F., Barzegar, Y., Barzegar, A., Marrone, S., Verde, L. and Pisani, P. 2025. Sustainable Water Quality Evaluation Based on Cohesive Mamdani

Characterization of Surface Water Potability in Ikare Rural Community, Nigeria. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis. 4: 114.

Oladipo, J.O., Akinwumiju, A.S., Aboyeji, O.S. and Adelodun, A.A. 2021. Comparison Between Fuzzy Logic and Water Quality Index Methods: A Case of Water Quality Assessment in Ikare Community, Southwestern Nigeria. Environmental Challenges. 3: 100038.

Ortega, J., Tóth, J., Moslem, S., Péter, T. and Duleba, S. 2020. An Integrated Approach of Analytic Hierarchy Process and Triangular Fuzzy Sets for Analyzing the Park-and-Ride Facility Location Problem. Symmetry. 12(8): 1225.

Patel, A. and Chitnis, K. 2022. Application of Fuzzy Logic in River Water Quality Modelling for Analysis of Industrialization and Climate Change Impact on Sabarmati River. Water Supply. 22(1): 238–250.

Ross, T.J. 1995. Fuzzy Logic with Engineering Applications. McGraw-Hill, New York, USA.

Ross, T.J. 2010. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. John Wiley.

Saini, J., Dutta, M. and Marques, G. 2021. Fuzzy Inference System Tree with Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm: A Novel Approach for PM10 Forecasting. Expert Systems with Applications. 183: 115376.

Trach, R., Trach, Y., Kiersnowska, A., Markiewicz, A., Lendo-Siwicka, M. and Rusakov, K. 2022. A Study of Assessment and Prediction of Water Quality Index Using Fuzzy Logic and ANN Models. Sustainability. 14(9): 5656.

UNESCO and UN-Water. 2024. The United Nations World Water Development Report 2024: Leveraging Water for Peace and Prosperity. UNESCO, Paris.

Yang, H., Chen, Z., Ye, Y., Chen, G., Zeng, F. and Zhao, C. 2021. A Fuzzy Logic Model for Early Warning of Algal Blooms in a Tidal-Influenced River. Water. 13: 3118.

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy Sets. Information and Control. 8: 338–353.

and Sugeno Fuzzy Inference System in Tivoli (Italy). Sustainability. 17(2): 579.

Gharibi, H., Sowlat, M.H., Mahvi, A.H., Mahmoudzadeh, H., Arabalibeik, H., Keshavarz, M., Karimzadeh, N. and Hassani, G. 2012. Development of a Dairy Cattle Drinking Water Quality Index (DCWQI) Based on Fuzzy Inference Systems. Ecological Indicators. 20: 228–237.

Gholizadeh, M. and Heydari, O. 2020. Evaluation of Gorganrood River Water Quality Based on Surface Water Quality Indicators in Gonbad Kavous. Iranian Journal of Health and Environment. 13(1): 33–48.

Gutiérrez, J.D., Riss, W. and Ospina, R. 2004. Lógica Difusa como Herramienta para la Bioindicación de la Calidad del Agua con Macroinvertebrados Acuáticos en la Sabana de Bogotá—Colombia. Caldasia. 26: 161–172.

Hashemi, S., Farzampour, T., Ramzani, S. and Khoshroo, G. 2012. Guidelines for Calculating Iran Water Quality Index. Department of Environment, Tehran.

Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S. and Bourrié, G. 2019. Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. Water. 11: 361.

Kambalimath, S. and Deka, P.C. 2020. A Basic Review of Fuzzy Logic Applications in Hydrology and Water Resources. Applied Water Science. 10: 191.

Khosrovyan, A. 2024. Biodiversity and Ecosystem Services in Rivers. Water. 16(15): 2091.

Moeinzadeh, H., Yong, K.T. and Withana, A. 2024. A Critical Analysis of Parameter Choices in Water Quality Assessment. Water Research. 258: 121777.

Mourhir, M., Rachidi, T. and Karim, M. 2014. River Water Quality Index for Morocco Using a Fuzzy Inference System. Environmental Systems Research. 3: 21.

Negnevitsky. 1993. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems. Addison-Wesley, New York, NY, USA.

Nollet, L.M.L. and Gelder, L.S.P. 2013. Handbook of Water Analysis. 3rd ed. CRC Press. 995 p.

Norouzian, K., Tajrish, M. and Abrishamchi, A. 2001. Water Quality Zoning of Rivers by the Technique of Fuzzy Clustering Analysis. Journal of Esteghlal. 20(1): 55–68. (In Persian)

Oladipo, J.O., Aboyeji, O.S., Akinwumiju, A.S. and Adelodun, A.A. 2020. Fuzzy Logic Interference for

Water Management in Agriculture
Vol. 13, No. 1, Spring and Summer 2026, 155-171

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۵، ص. ۱۷۱-۱۵۵

Fuzzy Routing of Water Quality for Agricultural Uses in the Gorganroud Watershed

A. Heshmatpour[*1], S. J. Sajadi[2] and S. I. Seiedi[3]

Abstract

Surface water quality is a key factor in the optimal allocation of river water resources for agricultural use. Water quality indices are widely applied in determining water suitability, particularly in agriculture. However, due to their deterministic nature, these indices often face challenges in accurately monitoring water quality. Therefore, this study compares the changes in water quality of four rivers — Zarrin Gol, Ramian, Galikesh, and Chel-Chai — in the Gorganrud watershed using the IRWQIsc index through both fuzzy and non-fuzzy methods. To achieve this, water samples were collected biweekly from November 2022 to May 2023, and parameters including pH, EC, DO, NO_3^-, NH_4^+, PO_4, and TH were measured according to APHA standards. After normalizing the values using IRWQIsc curves, a fuzzy model based on the Sugeno inference system with trapezoidal membership functions and twenty 'if–then' rules was implemented in Python to analyze data uncertainty and dispersion more effectively. The results showed that the average output values across stations using the fuzzy method were 80.58 with a standard deviation of 5.38 and a coefficient of variation of 0.0667, whereas the non-fuzzy method yielded an overall average of 77.31, a standard deviation of 8.57, and a coefficient of variation of 0.1107. Thus, the fuzzy model provided higher accuracy and consistency. Furthermore, in 75.5% of the samples, both methods yielded similar quality classifications, while in the remaining 24.5%, the fuzzy model demonstrated greater sensitivity in identifying boundary and critical conditions. Additionally, water quality in more than half of the stations was classified as "good" to "very good." Consequently, considering its ability to reduce uncertainty and its higher sensitivity in identifying marginal water quality zones, the fuzzy logic approach can serve as an effective decision-making tool for water resource managers in related planning activities.

Keywords: Comparison of indicators, Fuzzy logic, Resource sustainability, Surface water quality, Uncertainty assessment

1- Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran (*- Corresponding Author Email: Heshmatpoura@gmail.com)
2- Assistant Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran
3- Bachelor of Science in Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran
Received: 09 Jun 2025
Accepted: 07 Sep 2025