

پهنه‌بندی مکانی شاخص کیفی آبخوان شمال شرقی دشت بیجار و مقایسه کیفیت آب با روش‌های مختلف

عطاله ندیری^{۱*}، صالح طاهری زنگی^۲، ناصر جبرائیلی اندریان^۳

۱. دانشیار، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۹/۰۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۲/۰۵)

چکیده

با توجه به اینکه کیفیت آب شرب در سلامتی انسان‌ها نقش مهمی دارد، باید کیفیت آب آبخوان‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب شرب تجزیه و تحلیل شود. هدف از مطالعه حاضر، بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده‌شده برای شرب در شمال شرقی دشت بیجار با شاخص GQI با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS است. محدوده مطالعاتی آبخوان دشت بیجار یکی از آبخوان‌های استان کردستان است که منبع آب شرب قسمتی از شهر بیجار و بیش از ۱۲ روستا را تأمین می‌کند. شاخص کیفیت آب شرب با استفاده از چهار روش GQI، GQI-GA، GQI-FL-GA و GQI-FG برای این آبخوان تهیه شده و سپس، به‌منظور صحت‌سنجی و مقایسه نتایج چهار روش یادشده از ضریب همبستگی (r) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، روش GQI-FL-GA با ضریب همبستگی ۰/۸۹ و RMSE ۰/۰۱ بهترین نتایج و روش GQI-FG با ضریب همبستگی ۰/۸۶ و RMSE ۰/۱۱ ضعیف‌ترین نتایج را ارائه دادند. بر اساس روش شاخص کیفی آب ۹۱/۲ درصد از دشت کیفیت مناسب داشته و ۸/۸ درصد باقی منطقه که بیشتر بخش‌های شمال شرقی (خروجی دشت) بوده و کیفیت قابل قبول دارد.

کلیدواژگان: الگوریتم ژنتیک، دشت بیجار، شاخص کیفی آب، منطق فازی.

مقدمه

کیفیت آب زیرزمینی تابعی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است که به شدت تحت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های انسانی است. ساختار خاک و کیفیت آب‌های سطحی در یک منطقه، به‌نوعی تعیین‌کننده ترکیبات و کیفیت آب زیرزمینی است. فرایندهای ژئوشیمیایی عامل اصلی تغییرات کیفیت آب به‌صورت مکانی است [۱]. غلظت یون‌های اصلی یکی از شاخص‌های کیفی مهم آب زیرزمینی است که حد مجاز غلظت این یون‌ها در آب آشامیدنی توسط سازمان‌های مختلفی از جمله سازمان بهداشت جهانی [۲] و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران [۳] در قالب جدول‌های استاندارد و نیز در دیاگرام شولر مشخص شده است. از روش‌های متداول ارزیابی کیفی آب برای مصارف شرب، مقایسه نمونه‌های آب هر منطقه با معیارهای یادشده است. مقایسه با جدول‌های استاندارد و دیاگرام شولر امکان بررسی کیفیت آب را در یک نقطه خاص از منطقه مورد نظر ارائه می‌دهند. حال آنکه در صورت وجود روشی که کیفیت آب از لحاظ شرب را به صورت مکانی و با در نظر گرفتن غلظت همه یون‌های اصلی در کل منطقه نشان دهد، نتایج و استنباط بهتری را به همراه خواهد داشت. در این خصوص، تلاش‌های متعددی طی سال‌های گذشته صورت گرفته و شاخص‌های متعددی توسط محققان ارائه شده است که از جمله می‌توان به شاخص WQI, JAWQI, NFSWQI و شاخص GQI اشاره کرد. شاخص‌ها معمولاً محدودیت‌هایی دارند از جمله می‌توان به در دسترس بودن کلیه پارامترها و برخورد قطعی با مسائل کیفیت آب در توسعه هر شاخص اشاره کرد. می‌توان گفت که مزیت روش GQI برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی این است که این روش حتی در غیاب برخی از پارامترها دقت زیادی دارد. شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI^۱) که نخستین بار در آبخوان ناسو در کشور ژاپن به کار گرفته شد، شاخصی بر پایه نرم‌افزار ArcGIS است و خروجی آن نقشه واحدی است از تلفیق چندین پارامتر مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی که تغییرات مکانی کیفیت آب را در کل منطقه نشان می‌دهد [۴]. تحقیقات متعددی در زمینه پایش کیفیت منابع آب هم در ایران و هم در دنیا صورت

گرفته است. ریزمان و گودیپ (۲۰۱۰) با استفاده از شاخص کیفیت آب WQI و اطلاعات کیفی ۱۴ نقطه نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی در هند تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب را بررسی کردند [۵]. آنها کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مهربان را از نظر شاخص GQI و FGQI ارزیابی کردند و نشان دادند منابع آب این دشت در کیفیت نامطلوب تا مناسب قرار دارد [۶]. چراغی و همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی تجزیه و تحلیل آماری و شاخص کیفی آب زیرزمینی را در منطقه خرم‌آباد بررسی کردند. نتیجه پژوهش آنها بیان‌کننده کیفیت مناسب و قابل قبول آب زیرزمینی در جهت جریان بود [۷]. ساعتی و ملکیان (۲۰۲۰) طی پژوهشی آسیب‌پذیری و پهنه‌بندی ریسک آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل را ارزیابی کردند. این ارزیابی بر اساس سه شاخص جدید با سه عامل تراکم منابع نقطه‌ای آلاینده، آسیب‌پذیری ذاتی و محدوده گیرش آلودگی چاه‌ها بود و پارامترهای استفاده‌شده در این روش تحلیل حساسیت شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد شاخص یادشده که بر اساس غلظت نیترات کلراید و اسنچی شد، با شاخص آسیب‌پذیری همبستگی مثبتی داشت [۸]. میشرای و جا (۲۰۱۴) از منطق فازی برای مدل‌سازی کیفیت آب استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد شاخص توسعه داده‌شده به‌خوبی می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کیفی مناسب استفاده شود [۹]. دینگ و همکاران (۲۰۱۴) از شبکه عصبی ترکیبی و الگوریتم ژنتیک برای کیفیت آب رودخانه استفاده کردند و نشان دادند میانگین میزان پیش‌بینی کیفیت آب غیر آلوده و آلوده به ترتیب ۸۸/۹ و ۹۳/۱ درصد است، میزان پیش‌بینی جهانی تقریباً ۹۱ درصد است. سیستم پیش‌بینی کیفیت آب مبتنی بر ترکیبی از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های ژنتیک می‌تواند کیفیت آب را به‌طور دقیق پیش‌بینی کرده و پشتیبانی مفیدی را برای سیستم‌ها در زمان واقعی فراهم کند [۱۰]. تحقیقات صورت‌گرفته دیگری در دشت قزوین شاخص کیفی فازی با استفاده از رویکردهای تخمین مکانی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک به کل منطقه تعمیم دادند و نتایج حاصل کارایی بهتر این روش بود [۱۱] و همچنین، طی پژوهشی برای ارزیابی کیفیت آب شرب دشت مرودشت با استفاده از مدل استنتاج فازی تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند از بین دو روش قطعی و فازی، روش استنتاج فازی روشی ساده و مفید برای

ندیری و همکاران: پهنه‌بندی مکانی شاخص کیفی آبخوان شمال شرقی دشت بیجار و مقایسه کیفیت آب با روش‌های مختلف ۲۳۷

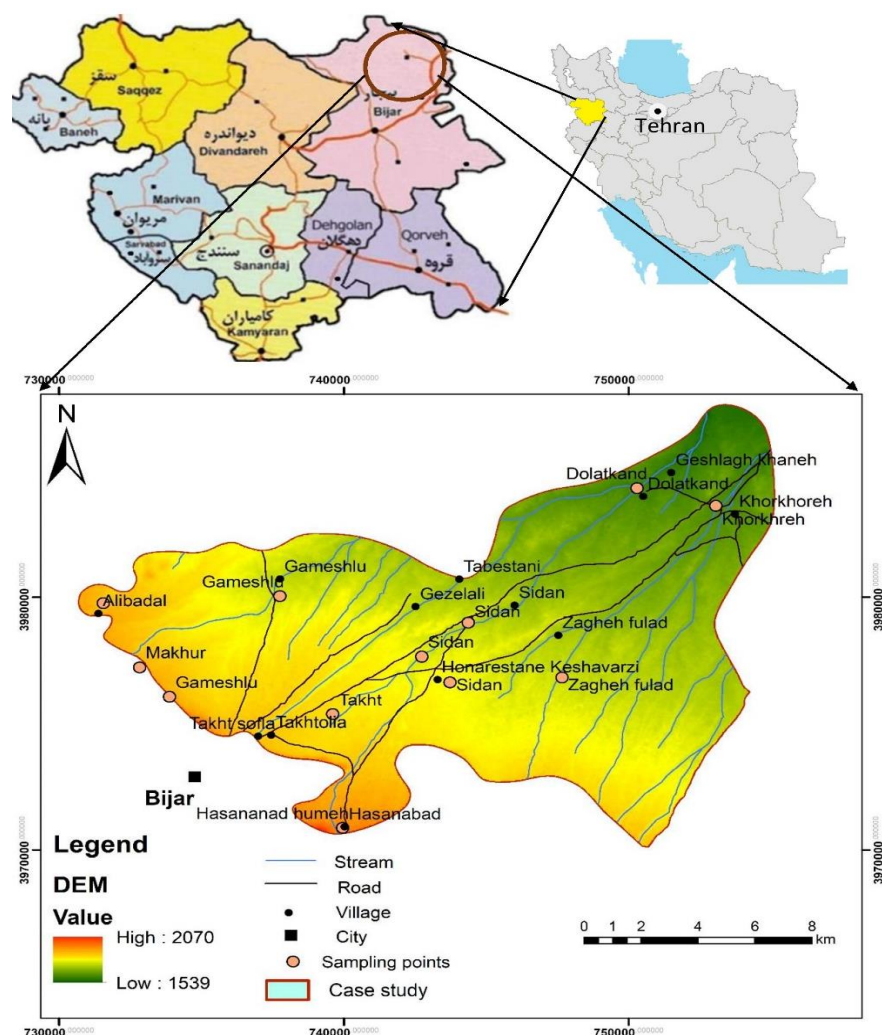
به‌منظور دستیابی به نتایج بهتر لایه‌های شاخص GQI با استفاده از روش ترکیبی نظارت‌شده الگوریتم ژنتیک و تلفیق روش الگوریتم ژنتیک با منطق فازی و فازی گاما بهره گرفته شده است و همچنین، تفسیر عوامل اصلی مؤثر بر هیدروشیمی منابع آب زیرزمینی در این دشت بررسی شد.

منطقه مطالعه‌شده

محدوده مطالعاتی دشت بیجار در شمال شرقی استان کردستان و در حوضه آبریز قزل‌اوزن واقع شده که وسعتی حدود ۲۱۸/۹۶ کیلومترمربع دارد. رودخانه قزل‌اوزن به‌صورت شرقی و غربی با شیب حدود یک درصد در این دشت جریان دارد (شکل ۱).

سنجش کیفیت آب مصارف شرب با RMSE کمتر است [۱۲]. با توجه به اینکه مقایسه بین این روش‌ها صورت نگرفته است، در این پژوهش سعی می‌شود مقایسه بین این روش‌ها صورت گیرد. پژوهش‌های صورت‌گرفته دیگری در دشت سراب برای به دست آوردن کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با استفاده از مدل استنتاج فازی نشان دادند ۴۱ نمونه در رده مطلوب و با سطح اطمینان ۶۵ درصد تا ۸۳ درصد و ۲۶ نمونه در رده قابل قبول و با سطح اطمینان ۳۷ درصد تا ۶۵/۴ درصد قرار گرفتند. ۳ نمونه باقی‌مانده نیز در رده غیر قابل قبول و با حداکثر سطح اطمینان ۲۳/۴ درصد قرار گرفتند [۱۳].

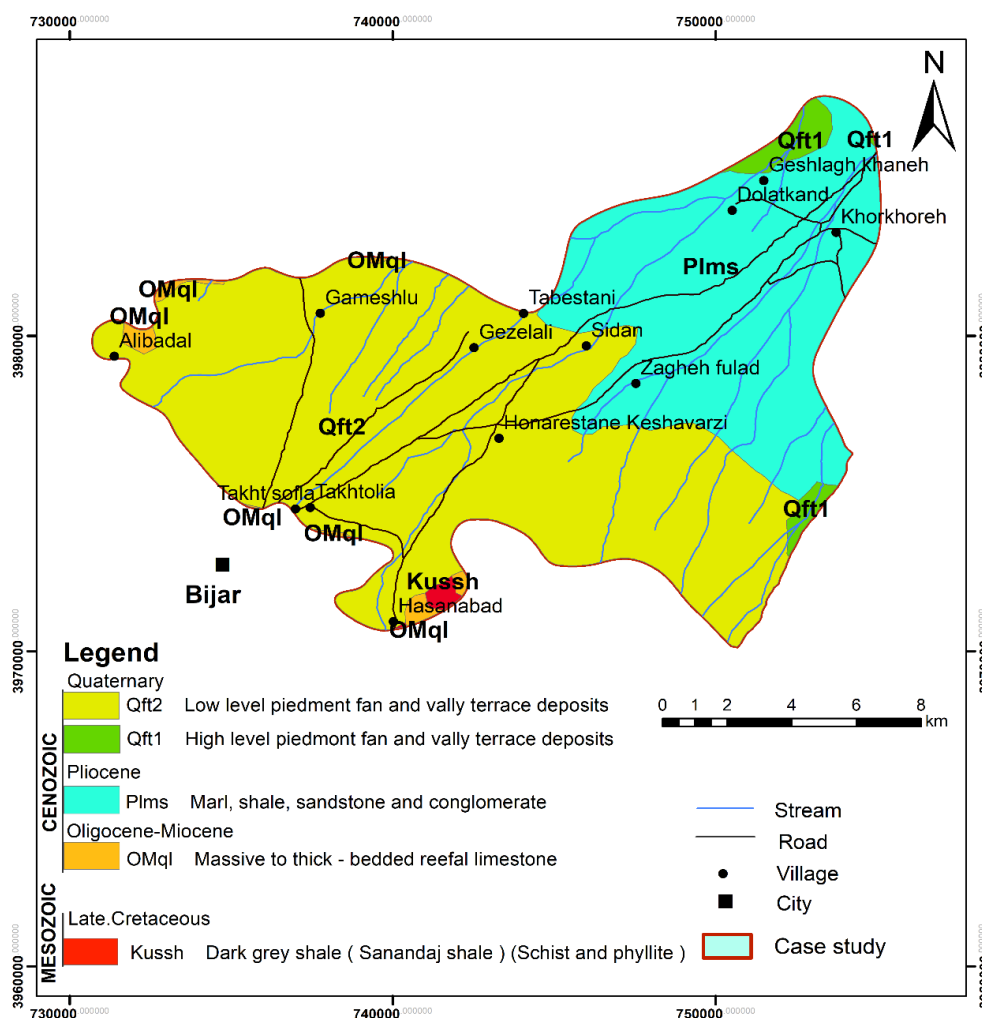
هدف از مطالعه حاضر، بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده‌شده برای شرب در شمال شرقی دشت بیجار با شاخص GQI با استفاده از نرم‌افزار GIS است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده

جوان‌ترین واحدهای سنگی منطقه هستند که گستردگی بزرگی را پوشانده‌اند (شکل ۲). در دشت بیجار آبخوان از نوع آبرفتی آزاد است. در واحدهای آهکی که در ارتفاعات محدوده مطالعاتی واقع شده‌اند، آبخوان‌ها از نوع تحت فشار و نشتی است. به‌طور متوسط عمق آبرفت در منطقه حدود ۷۸ متر و کمترین میزان عمق سنگ‌بستر نیز ۱۵/۷ متر در قسمت شمال شرقی دشت است که خروجی آبخوان است. جهت جریان عمومی آب زیرزمینی از غرب و جنوب غرب به سمت شمال شرقی دشت است.

این محدوده مطالعاتی در پهنه سنندج و سیرجان واقع شده که کهن‌ترین سنگ‌ها مربوط به زمان کرتاسه است که دربرگیرنده سنگ‌های رسوبی (شیست و فیلیت) و دگرگونی و آتشفشانی هستند و واحدهای جوان‌تر بیشتر آهکی‌های (الیگومیوسن) و کنگلومرایی هستند که روی واحدهای جوان‌تر قرار گرفته‌اند و فوران‌های آتشفشانی کرتاسه به‌صورت بازالتی و آندزیتی هستند که در دو مرحله میوسن و کواترنر موجب پیدایش این سنگ‌ها شده است. واحدهای مارنی و تخریبی پلیوسن و کواترنر



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده

پتاسیم، سولفات، کلر، بی‌کربنات به همراه UTM نقاط است و یون نیترات توسط پژوهشگران به‌صورت جداگانه به همراه UTM نقاط، نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه دانشگاه تبریز آنالیز شد که در تحقیق حاضر استفاده شده است. سپس، برای صحت‌سنجی و کنترل داده‌ها، از روش

مواد و روش

داده‌های کیفی اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان شامل ۹ داده کیفی خردادماه ۱۳۹۶ مطالعه شد. داده‌های کیفی جمع‌آوری از سازمان آب منطقه‌ای دارای پارامترهای زیر است: pH، TDS، کلسیم، منیزیم، سدیم،

(RankMap) هر پارامتر به دست آید، به این ترتیب، مقدار ۱- در نقشه تولید شده در مرحله قبل به ۱ و مقدار صفر به ۵ و مقدار ۱ به ۱۰ در نقشه رتبه‌بندی شده تغییر می‌یابند. در این نقشه‌ها رتبه ۱ نشان‌دهنده کیفیت خوب آب زیرزمینی و رتبه ۱۰ بیانگر کیفیت بسیار بد آب زیرزمینی هست. برای تبدیل واحد هر پیکسل نقشه قبلی (C) به مقدار جدید (r) از رابطه ۳ که یک تابع چندجمله‌ای است، استفاده می‌شود:

$$r = 0.5 \times C^2 + 4.5 \times C + 5 \quad (3)$$

مرحله چهارم: تهیه نقشه GQI

نقشه‌های رتبه‌بندی شده، وضعیت آبخوان را نسبت به هریک از این پارامترها نشان می‌دهند، بنابراین به منظور ایجاد یک نقشه که نمایانگر تمام ۷ پارامتر شیمیایی باشد و وضعیت کلی کیفیت آب را در مقایسه با استاندارد WHO (جدول ۱) ارائه کند از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) استفاده شده و لایه‌های مربوط به پارامترها توسط رابطه ۴ با یکدیگر تلفیق شده‌اند:

$$GQI = 100 - \frac{r_1w_1 + r_2w_2 + \dots + r_7w_7}{7} \quad (4)$$

در این رابطه، r رتبه هر پیکسل از نقشه‌های رتبه‌بندی شده و w وزن نسبی هر یک از پارامترها است که برابر با مقدار میانگین کل پیکسل‌های نقشه رتبه‌بندی شده مربوطه است. برای محاسبه GQI در واقع از پارامترهای مختلف میانگین وزنی گرفته می‌شود که پارامترها با مقدار بیشتر (تفاوت بیشتر با مقدار استاندارد) دارای وزن نسبی و در نتیجه، تأثیرگذاری بیشتری هستند. به این دلیل که مقدار سمی بودن عناصر مختلف برای انسان متفاوت است، یادآوری این نکته مهم است که در شرایطی استفاده از میانگین برای همه پارامترها صحیح است که مقدار سمی و خطرناک بودن آنها برای انسان تقریباً به یک اندازه باشد و اگر یک یا چند عنصر، سمی‌تر از دیگر عناصر باشند، فرمول باید واسنجی شوند و ضرایب تغییر کنند. نقشه نهایی GQI بر اساس استاندارد WHO در شکل ۳ آورده شده است. مقادیر زیاد شاخص کیفی نشان‌دهنده کیفیت خوب آب و مقادیر کم، نشان‌دهنده کیفیت بد آب است که در جدول ۲ آورده شده است [۴].

بالانس یونی هانسلو (۱۹۹۵) استفاده شد که خطای نتایج حاصل کمتر از ۵ درصد است، خطای نتایج آنالیز طبق رابطه ۱ مورد تأیید بود [۱۴].

$$\% < 10 \times (\text{مجموع کاتیون‌ها} + \text{مجموع آنیون‌ها}) / (\text{مجموع کاتیون‌ها} - \text{مجموع آنیون‌ها}) = \text{درصد خطای آزمون} \quad (1)$$

برای نشان دادن توزیع و پهنه‌بندی یون‌های اصلی، TDS و نیترات و تعیین شاخص کیفیت آب (GQI) به صورت مکانی از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. همچنین، از روش‌های الگوریتم ژنتیک و تلفیق آن با منطق فازی برای بهره بردن از مزیت این روش‌ها استفاده شد.

روش GQI

در تحقیق حاضر بر اساس معیارهای استاندارد WHO ارزیابی انجام گرفت. به منظور محاسبه شاخص GQI مطابق متدولوژی ارائه شده توسط بایکر (۲۰۰۷) مراحل زیر برای تهیه نقشه نهایی انجام پذیرفته است: [۴].

مرحله اول: تهیه نقشه‌های رستری هریک از پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی

در این مرحله با استفاده از نرم‌افزار GIS مناسب‌ترین روش درون‌یابی برای داده‌های یاد شده برای تهیه نقشه‌های رستری روش عکس مجذور فاصله (IDW) تشخیص داده شد. سپس، با استفاده از الحاقیه Geostatistical Analyst در نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌های مربوط به ۷ پارامتر شیمیایی از داده‌های استفاده شده با روش IDW درون‌یابی شده و نقشه رستری مربوط به غلظت هر پارامتر تهیه شد.

مرحله دوم: تهیه نقشه‌های هم‌مقیاس

در مرحله بعدی برای هم‌مقیاس شدن و هم معیار شدن داده‌های متفاوت هریک از پارامترها، با استفاده از رابطه ۱ غلظت هر پیکسل (X') از نقشه‌های رستری مرحله قبل با مقدار استاندارد WHO برای هر پارامتر (X) ارتباط برقرار شد [۴].

$$C = \frac{X' - X}{X' + X} \quad (2)$$

نتیجه این یکسان‌سازی مقیاس‌ها تولید ۹ نقشه جدید هست که ارزش پیکسل‌های آنها بین ۱- و ۱+ تغییر می‌کنند.

مرحله سوم: تهیه نقشه‌های رتبه‌بندی

در این مرحله غلظت‌ها در نقشه‌های یاد شده بین ۱- تا ۱۰ درجه‌بندی می‌شوند تا نقشه رتبه‌بندی مرحله شده

در این مطالعه، از روش الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی وزن‌ها در ترکیب ۷ پارامتر شامل یون‌های Ca، K، Na، Mg، Cl، HCO₃، SO₄، به صورت میانگین وزن‌دار استفاده شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، وزن‌های مربوط به پارامترها در شاخص GQI است. در این روش، هدف تعیین دقیق شاخص کیفیت آب شرب به صورت تعیین دقیق وزن‌های هر یک ۷ پارامتر در روش GQI است. تابع هدف در این مدل بهینه‌سازی، بیشینه کردن ضریب همبستگی بین متوسط شاخص کیفیت آب شرب حاصل از ۷ لایه تلفیق شده در روش GQI و متوسط غلظت TDS و نیترات است. وزن‌های مناسب برای هر روش بر اساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n (VI_j - \overline{VI})(N_j - \overline{N})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (VI_j - \overline{VI})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (N_j - \overline{N})^2}} \quad (5)$$

Constant : $1 \leq W_j \leq 10, j = 1, 2, \dots, 10$

در این رابطه F تابع هدف، n تعداد داده، VI_j شاخص GQI حاصل از ترکیب ۷ پارامتر تأثیرگذار در کیفیت آب شرب، \overline{VI} میانگین شاخص GQI حاصل از ترکیب ۷ پارامتر تأثیرگذار در کیفیت آب شرب، N_j متوسط نرمال شده TDS و NO₃، \overline{N} میانگین متوسط نرمال شده TDS و NO₃ و W_j وزن‌های داده شده به ۷ پارامتر تأثیرگذار در کیفیت آب شرب است.

روش Fuzzy Gamma (FG)

نظریه فازی برای نخستین بار در سال ۱۹۶۵ توسط دانشمند ایرانی به نام لطفعلی عسگرزاده، استاد علوم کامپیوتر دانشگاه برکلی کالیفرنیا معرفی شد. بحث منطق فازی با مفهوم مجموعه‌های فازی آغاز شد که در آن یک مجموعه فازی به صورت مجموعه‌ای بدون مرز مشخص تعریف می‌شود. منطق فازی مفهوم ریاضی ساده‌ای دارد و دارای انعطاف‌پذیری زیادی است. منطق فازی به زبان معمولی انسان‌ها نزدیک است و با استفاده از آن می‌توان عبارات‌های زبانی را به آسانی مدل کرد. با استفاده از این منطق می‌توان مسائلی را که عدم قطعیت دارند و غیرخطی هستند، به راحتی و با سرعت حل کرد.

کاربرد منطق فازی در حل مسئله مکان‌یابی به این صورت است که پارامترهای موجود در مکان‌یابی تا حدود

جدول ۱. مقادیر مجاز پارامترهای شیمیایی آب بر اساس استانداردهای WHO بر حسب (mg/lit)

پارامتر	جهانی	حداکثر مجاز بر اساس استاندارد سازمان بهداشت
کلسیم	۳۰۰	
منیزیم	۳۰۰	
سدیم	۲۰۰	
کلر	۲۰۰	
سولفات	۲۵۰	
بی‌کربنات	۱۵۰	
پتاسیم	۱۲	
نیترات	۵۰	
TDS	۶۰۰	

جدول ۲. تقسیم‌بندی کیفی آب بر پایه GQI (بایکر و همکاران، ۲۰۰۷)

میزان GQI	پارامتر طبقه‌بندی آب
۹۰-۱۰۰	مناسب
۷۰-۹۰	قابل قبول
۵۰-۷۰	متوسط
۲۵-۵۰	نامناسب
۰-۲۵	کاملاً نامطلوب

الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین است و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است. یک کاربرد متداول الگوریتم ژنتیک، استفاده از آن به عنوان تابع بهینه‌کننده است. در الگوریتم‌های ژنتیکی، شیوه تکامل ژنتیکی موجودات زنده شبیه‌سازی می‌شود. این الگوریتم‌ها با الهام از روند تکاملی طبیعت مسائل را حل می‌کنند، به این صورت که مانند طبیعت یک جمعیت انبوه از موجودات را تشکیل می‌دهد و سپس، با اعمالی روی این مجموعه به یک مجموعه بهینه و یا موجود بهینه دست می‌یابند. در این روش هر مسئله بهینه‌سازی سه بخش پایه و اساسی شامل تابع هدف، متغیر تصمیم یا پارامترها و قیدهای شرط یا محدودیت را دارد که از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۱۵ و ۱۶]. برای هر مسئله بهینه‌سازی، جمعیتی از راه‌حل‌های محتمل انتخاب شده و به بهترین راه‌حل‌های ممکن تبدیل می‌شوند. هر راه‌حل می‌تواند بر اساس سازگاری‌اش با استفاده از اپراتورهای انتخاب، تقاطع و جهش تغییر یابد.

ژنتیک بهینه‌سازی شد. فازی‌سازی با استفاده از تابع عضویت فازی (Fuzzy Membership) از نوع خطی (Linear) در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. در تحقیق حاضر از تابع لجستیک رابطه ۷ برای فازی کردن نقشه استفاده شده است. تابع لجستیکی کل داده‌ها را به دامنه محدود (۰، ۱) انتقال می‌دهد [۱۸].

$$F_x = 1 / (1 + e^{-s(X-i)}) \quad (7)$$

در این رابطه، F_x امتیاز فازی اختصاص یافته به X در بازه صفر و یک، X مقدار عددی در لایه‌ها در بازه نامحدود، s و i به ترتیب شیب و نقطه عطف تابع لجستیک هستند. همه لایه‌های تهیه شده از ۷ پارامتر تأثیرگذار در کیفیت آب شرب با روش گفته شده به فازی تبدیل شد.

نتایج

نتایج به دست آمده از روش GQI

بر اساس روش به کاررفته در مرحله اول پارامترهای مهم تأثیرگذار بر کیفیت آب شرب شامل Ca ، K ، Na ، Mg ، Cl ، SO_4 ، HCO_3 ، انتخاب شد. در مرحله بعد غلظت هر یک از پارامترها در محیط نرم‌افزار GIS درون‌یابی شد. سپس، توسط روابط ۲ و ۳ وزن و رتبه هریک از پارامترها محاسبه توسط Raster Calculator تمامی لایه‌ها هم‌پوشانی شده و لایه نهایی GQI تهیه شد (شکل ۳).

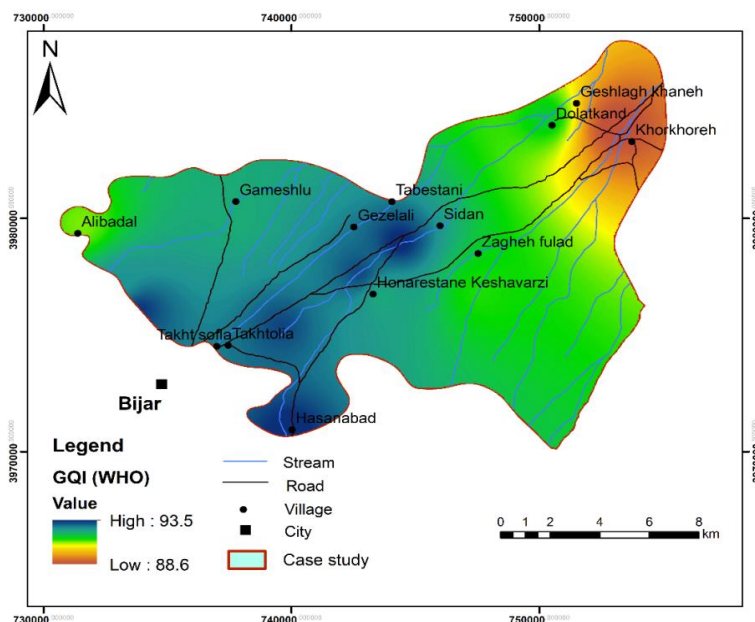
زیادی ماهیت فازی دارند. مثال این موضوع، فاکتورهایی هستند که ربط به فاصله دارند. برای این پارامترها، مجموعه‌های فازی تعریف می‌شود که در آنها هر پیکسل به‌عنوان عضوی از این مجموعه با توجه به فاصله‌ای که از عارضه دارد، درجه عضویت متفاوتی به خود می‌گیرد. اگر تمام پارامترهای مسئله به صورت فازی با مقادیر عضویت صحیح تعریف شوند، می‌توان برای تلفیق پارامترها از عملگرهای مناسب فازی استفاده کرد. نوع عملگر استفاده شده نیز بستگی به شیوه تأثیرپذیری پارامترها از یکدیگر و اثر نهایی (افزایشی یا کاهش) عملگر روی مجموعه پارامترها دارد.

عملگر فازی گاما به طور هم‌زمان از دو پارامتر جمع و ضرب فازی استفاده می‌کند (رابطه ۶) که در آن پارامتر Y در محدوده صفر و یک قرار دارد. وقتی Y یک باشد ترکیب همان جمع جبری فازی خواهد بود و وقتی صفر باشد، ترکیب برابر با حاصل ضرب فازی است [۱۷]. تمام معیارهای ورودی تحت تأثیر این رابطه قرار می‌گیرد که می‌تواند به‌عنوان عملگر قابل اطمینانی در نظر گرفته شود (رابطه ۶).

$$\mu_{FG} = \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-Y} \cdot Y \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right) \quad (6)$$

فازی - الگوریتم ژنتیک (FL-GA)

در این مطالعه نقشه تمام ۷ لایه تهیه شده برای تهیه شاخص GQI فازی‌سازی شده و با روش ترکیبی الگوریتم



شکل ۳. نقشه شاخص کیفی آب زیرزمینی GQI دشت بیجار بر اساس استاندارد WHO

وزن‌ها برابر ۱۰ و کمترین آن برابر ۱ در نظر گرفته شد. سپس، با بیشینه کردن تابع هدف که همان ضریب همبستگی بین غلظت متوسط نرمال شده NO₃ و TDS و میانگین وزنی ۷ پارامتر تأثیرگذار در کیفیت آب شرب است (رابطه ۷). وزن‌های جدید و بهینه‌شده‌ای به دست آمد که در جدول ۴ ارائه شده است. در نهایت، بر اساس این وزن‌های بهینه، نقشه شاخص کیفیت آب به روش الگوریتم ژنتیک برای منطقه تهیه شد (شکل ۴).

نتایج به دست آمده از فازی گاما (Fuzzy Gamma)

در این روش ابتدا همه لایه‌های به دست آمده از درون‌یابی ۷ پارامتر در نظر گرفته شده برای کیفیت آب با استفاده از تابع عضویت فازی (Fuzzy Membership) در محیط نرم‌افزار GIS به فازی تبدیل شده و به بازه بین ۰ و ۱ آورده شده سپس، با استفاده روش فازی گاما (Fuzzy Gamma) همپوشانی شدند. در این همپوشانی، وزنی به مقادیر عضویت هریک از لایه‌ها اختصاص پیدا می‌کند و همپوشانی تحت تأثیر همین وزن انجام می‌شود. نکته درخور توجه در اجرای مدل فازی گاما محاسبه مقدار گاما است. برای این منظور، باید به ازای هر گامای ورودی یک نقشه خروجی تولید کرد و میزان وابستگی آن را با لایه میانگین غلظت نیترات و TDS محاسبه کرد به این ترتیب، با محاسبه وابستگی‌های موجود در حد فاصل صفر تا ۱ گامای مناسب تعیین می‌شود. اگر وزن گاما کوچک‌تر انتخاب شود، همپوشانی مشابه روش product خواهد بود و در صورت انتخاب وزن بزرگ‌تر، همپوشانی گاما به همپوشانی sum نزدیک‌تر خواهد شد. در این همپوشانی به Gamma optional مقادیر ۰/۳، ۰/۷ و ۰/۹ داده شد و در نهایت، به علت بیشترین تطابق با مقادیر مشاهداتی وزن ۰/۹ در نقشه نهایی اعمال شد (شکل ۵).

با توجه به جدول ۳ محاسبات انجام شده مقدار شاخص کیفی در منطقه مطالعه شده بر اساس استاندارد WHO بین ۸۸/۶ تا ۹۳/۵ متغیر بوده و بیانگر این است که در مجموع آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعه شده از نظر استانداردهای آب آشامیدنی در رده کیفیت مناسب و قابل قبول قرار می‌گیرد.

روند تغییرات GQI در این دشت بیشتر تبعیت از شرایط تغذیه آبخوان دارد. در مناطقی که آبخوان از نفوذپذیری بیشتری برخوردار است و شرایط تغذیه به دلیل وجود رودخانه‌های پرآب مناسب‌تر است، مقادیر GQI نسبت به دیگر مناطق درصد بیشتری را نشان می‌دهد. طبق روند (چیوتارو، ۱۹۵۵) در جهت جریان، طی زمان انحلال سازندهای زمین‌شناسی بیشتر شده و سبب افزایش هدایت الکتریکی می‌شود یعنی کیفیت آب زیرزمینی از منطقه تغذیه به منطقه دشت کاهش پیدا می‌کند و از طرف دیگر، کیفیت آب زیرزمینی با سنگ‌شناسی نیز تغییر می‌کند [۱۹]. به این صورت که جهت عمومی حرکت آب‌های زیرزمینی در دشت بیجار در جهت مسیر واحدهای Qt2 به سمت واحدهای مارن و شیلی پلیوسن است. واحدهای شیلی و مارنی به همراه ژئوسپس سبب کاهش جزئی کیفیت آب در خروجی دشت شده است.

نتایج به دست آمده از GQI-GA

روش دیگر که برای همپوشانی پارامترهای Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃ و SO₄ در تحقیق حاضر به کار برده شده، استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای اجرای روش الگوریتم ژنتیک، ابتدا برای هریک از پارامترها وزن‌های تصادفی داده شد. وزن‌های تصادفی در نظر گرفته شده همان متغیرهای تصمیم مسئله هستند. قیود شرط نیز برای هر پارامتر به گونه‌ای تعریف شد که بیشترین مقدار متغیر یا همان

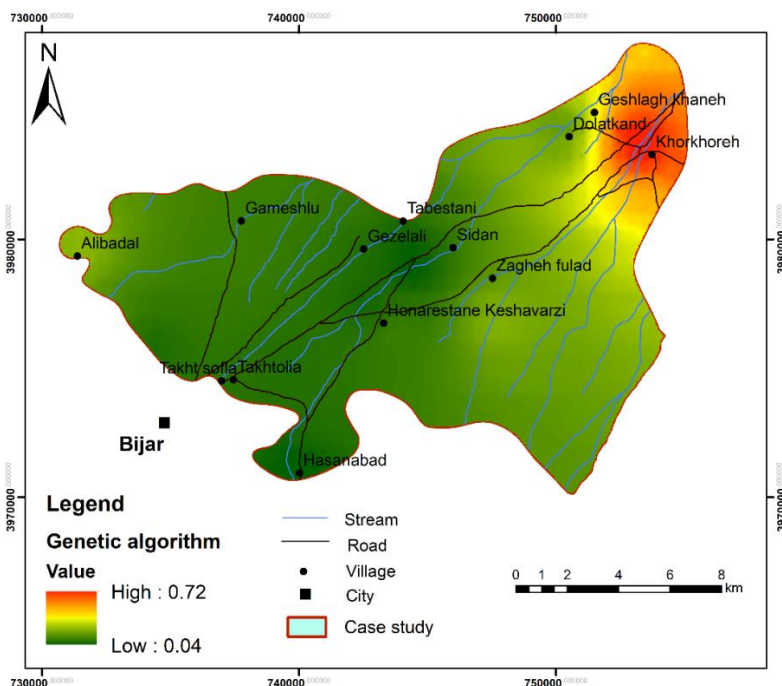
جدول ۳. درصد مساحت برای هر کیفیت آب زیرزمینی (GQI) در منطقه مطالعه شده

پارامتر طبقه‌بندی آب	میزان GQI	منطقه GQI بر حسب کیلومتر مربع	درصد GQI بر اساس WHO
مناسب	۹۰-۱۰۰	۱۸۸/۹۶	۸۶/۳
قابل قبول	۷۰-۹۰	۳۰	۱۳/۷
متوسط	۵۰-۷۰	-	-
نامناسب	۲۵-۵۰	-	-
کاملاً نامطلوب	۰-۲۵	-	-

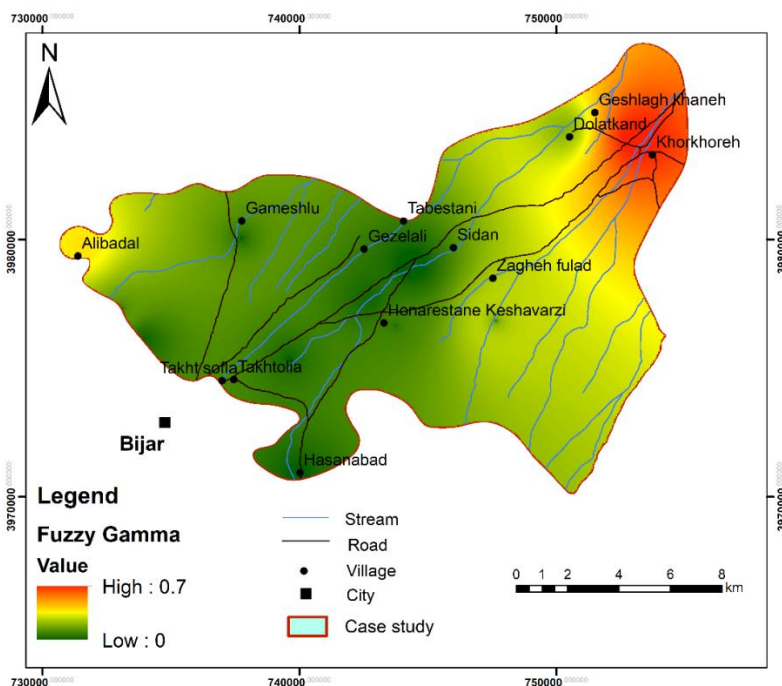
ندیری و همکاران: پهنه‌بندی مکانی شاخص کیفی آبخوان شمال شرقی دشت بیجار و مقایسه کیفیت آب با روش‌های مختلف ۲۴۳

جدول ۴. ضرایب وزنی بهینه‌شده به روش الگوریتم ژنتیک (GA)

پارامتر	سولفات	کلر	بی‌کربنات	منیزیم	پتاسیم	سدیم	کلسیم
وزن بهینه‌شده	۹/۵۰	۹/۵۰	۵/۳۱	۵/۹۳	۱	۹/۵۰	۵/۳۱



شکل ۴. نقشه اصلاح‌شده شاخص کیفی آب به روش الگوریتم ژنتیک



شکل ۵. نقشه اصلاح‌شده شاخص کیفی آب به روش فازی گاما

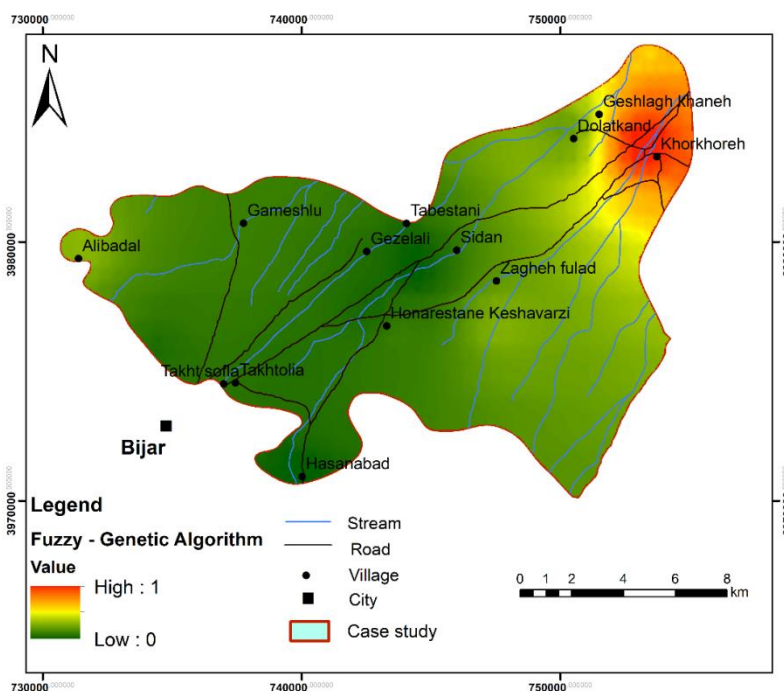
Membership) در محیط نرم‌افزار GIS به فازی تبدیل شده و به بازه بین صفر و ۱ آورده شده و با روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد (شکل ۶). وزن‌های جدید و بهینه‌شده‌ای به دست آمد که در جدول ۵ ارائه شده است.

نتایج به دست آمده از روش GQI-FL-GA

روش دیگر استفاده شده برای تعیین نقشه کیفیت آب استفاده از منطقه فازی است. به این صورت همه لایه‌های به دست آمده از درون‌یابی ۷ پارامتر در نظر گرفته شده برای کیفیت آب با استفاده از تابع عضویت فازی (Fuzzy

جدول ۵. ضرایب وزنی بهینه‌شده به روش فازی الگوریتم ژنتیک (GA)

پارامتر	سولفات	کلر	بی‌کربنات	منیزیم	پتاسیم	سدیم	کلسیم
وزن بهینه‌شده	۷/۲۶	۹/۹۳	۲/۶	۴/۳۷	۱/۶۸	۴/۴۷	۶/۱۵



شکل ۶. نقشه اصلاح شده شاخص کیفی آب به روش الگوریتم فازی-ژنتیک

تأثیر نظر کارشناسی و حل مشکل عدم قطعیت از روش نظارت شده الگوریتم ژنتیک و منطق فازی استفاده شد. برای اجرای الگوریتم ژنتیک ابتدا به هر یک از پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت آب وزن‌های تصادفی داده شد. سپس، با بیشینه کردن تابع هدف که همان ضریب همبستگی متوسط غلظت NO₃ و TDS با میانگین وزنی شاخص GQI (رابطه ۴)، وزن‌های جدید و بهینه‌شده‌ای به دست آمد که در جدول ۴ ارائه شده است. در نهایت، بر اساس وزن‌های بهینه‌شده نقشه کیفیت آب شرب به روش الگوریتم ژنتیک برای منطقه تهیه شد. در ادامه، از فازی سازی الگوریتم ژنتیک و

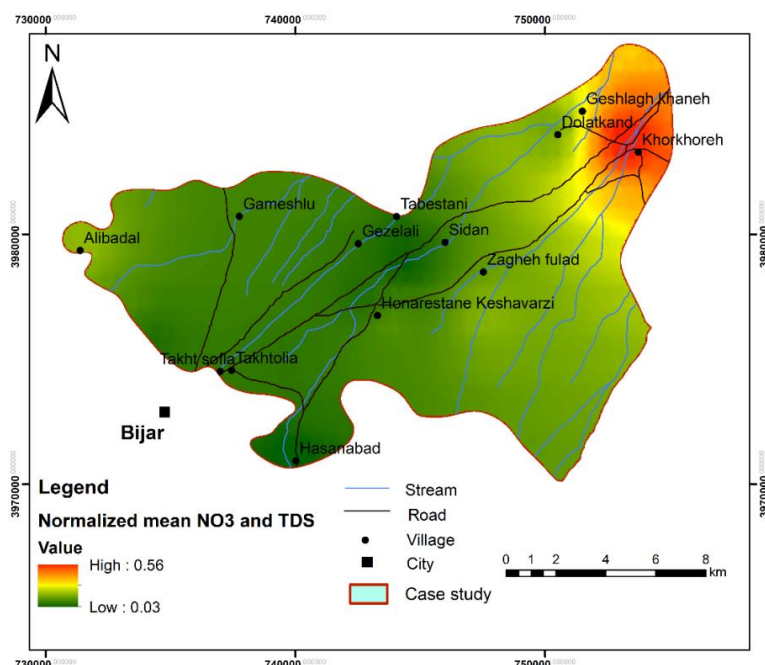
صحت‌سنجی و مقایسه روش‌ها

برای صحت‌سنجی روش‌های ارزیابی کیفیت آب از متوسط داده‌های غلظت نیترات و TDS اندازه‌گیری شده در ۱۲ نقطه از منطقه مطالعاتی با توزیع مناسب استفاده شد (شکل ۷). با انطباق مقادیر متوسط نرمال شده غلظت نیترات و TDS با نقشه کیفیت GQI مقایسه انجام شد و به منظور بررسی دقیق‌تر از ضریب همبستگی (r) و میانگین مجذور خطای مربعات (RMSE) استفاده شد (جدول ۶). با استفاده از نتایج به دست آمده از ضریب همبستگی و RMSE می‌توان نتیجه گرفت که روش GQI نتایج مطلوبی را ارائه داده است. سپس، به منظور کاهش

ندیری و همکاران: پهنه‌بندی مکانی شاخص کیفی آبخوان شمال شرقی دشت بیجار و مقایسه کیفیت آب با روش‌های مختلف ۲۴۵

روش بهتری برای ارزیابی کیفیت آب شرب در منطقه مطالعه شده است که بر اساس این روش به ترتیب حدود ۸/۸ و ۹۱/۲ درصد از آبخوان منطقه مطالعه شده کیفیت مناسب و قابل قبول قرار دارد.

همچنین، از روش فازی گاما استفاده شده و r و RMSE برای هر دو روش یادشده محاسبه شد (جدول ۵). با توجه به نتایج از هر ۴ روش که در جدول ۶ ارائه شده است، ملاحظه می‌شود که روش فازی-الگوریتم ژنتیک



شکل ۷. نقشه میانگین نرمال شده NO3 و TDS

جدول ۶. ضریب همبستگی (r) و میانگین مجذور خطای مربعات (RMSE)

روش	ضریب همبستگی	میانگین مجذور خطای مربعات
GQI	۰/۸۸	۰/۰۷
ژنتیک الگوریتم	۰/۸۹	۰/۰۵
فازی - الگوریتم ژنتیک	۰/۸۹	۰/۰۱
فازی گاما	۰/۸۶	۰/۱۱

فازی الگوریتم ژنتیک بخش‌هایی از غرب منطقه مطالعاتی را نیز در رده آب قابل قبول قرار داده‌اند. روش نظارت شده الگوریتم ژنتیک با r بیشتر و RMSE کمتر، از روش GQI و فازی گاما روش‌ها نتایج بهتری ارائه داده است. این نتایج تأییدکننده مطالعات قبلی در بررسی کیفیت آب شرب در دیگر مناطق کشور بوده است که توانایی روش‌های نظارت شده را نشان می‌دهد (مانند مطالعات ناصری و همکاران [۱۱]، نیکو و همکاران [۱۶]، لرمونتو [۲۰] و نصیری [۲۱]). همچنین، روش فازی گاما با ضریب همبستگی کم و RMSE بیشتر از بقیه روش‌ها ضعیف‌ترین روش برای تعیین شاخص کیفی آب قرار گرفت که این به

بحث و نتایج

نمونه‌برداری و تهیه نقشه میانگین نرمال شده NO3 و TDS مشاهده شد که بخش شمال شرقی منطقه که خروجی دشت است کیفیت آب قابل قبول و در بقیه مناطق از کیفیت مناسب برخوردار است. بر اساس نتایج هر چهار روش که GQI، الگوریتم ژنتیک و فازی-الگوریتم ژنتیک و فازی گاما نقشه‌های کیفیت آب شرب به دست آمده با وجود تفاوت‌های موجود در بین روش‌ها شباهت‌های کلی داشته و شمال شرق منطقه را در رده آب با کیفیت قابل قبول نشان می‌دهند. با این وجود، روش GQI و فازی گاما به خلاف دو روش الگوریتم ژنتیک و

- [3]. Anonymous. Iran Institute of Standards and Industrial Research. Drinking water - physical and chemical properties. 2010 [In Persian].
- [4]. Babiker I. S, Mohamed M. A. A, Hiyama T. Assessing groundwater quality using GIS, Resources Management. 2007; 21 699-715.
- [5]. Rizman, R, and Gurdeep, S. Assessment of Ground water QUALITY status by using water quality index method in Orissa, India. World applied sciences journal. 2010; 9(12), 1392-1397.
- [6]. Asghari Moghadam A, Javanmard Z, VEDIATI M, Najib M. Assessing the quality of groundwater resources in Mehraban plain using GQI and FGQI methods. Journal of Hydrogeomorphology. 2015; 2(2):79-98 [in Persian].
- [7]. Cheraghi Z, Sari Khani R, Farahpour M, Ghasemi Dehnavi A. Statistical evaluation and analysis of parameters and groundwater quality index for drinking water in Khorramabad region. Water Resources Engineering Quarterly. 2018; 39:1-14.
- [8]. Saadati H. Malekian, A. Moghaddam A. A. Vulnerability assessment and groundwater risk zoning in Ardabil plain. Journal of Water and Irrigation Management. 2020; 10(1): 157-171. [In Persian].
- [9]. Mishra, N, jha, p. Fuzzy expert system for drinking water quality index. Recent research in science and technology. 2014; 6(1):122-125.
- [10]. Ding Y. R, Cai Y. J, Sun P. D, Chen B. The Use of Combined Neural Networks and Genetic Algorithms for Prediction of River Water Quality. Journal of applied research and technology. 2014; 2 (3):493-499.
- [11]. Naseri M, Tajrishi M, Niko M, Zahirpour J. Detection and spatial zoning of multivariate groundwater quality index using a combination of fuzzy methods. Journal of Water and Wastewater. 2013; 24(1): 82-93. [In Persian].
- [12]. Jahangir M. Hagigi P. Sadati Nejjhad S. Groundwater quality assessment for drinking water using fuzzy inference model (Case study: Marvdasht plain). Eco Hydrology. 2018; 5(2): 663 – 673. [In Persian].
- [13]. Vadiati M, Asghari Moghadam A, Nakhaei M. Evaluation of groundwater quality for agricultural use using fuzzy inference model. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering. 2017; 35:73-80 [In Persian].
- [14]. Hounslow A. W. Water Quality Data: Analysis and Interpretation, CRC Press LCC, Lewis publishers, Chapter 2.1955; (4) 397.

خلاف مطالعات قبلی بوده است (مطالعه رشید سرخ‌آبادی [۲۲]). روش فازی-الگوریتم ژنتیک (Fuzzy-GA) با وجود اینکه ضریب همبستگی برابر با الگوریتم ژنتیک دارد، ولی RMSE را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده است. بنابراین، می‌توان از روش ترکیبی به‌عنوان روشی کارا برای تعیین شاخص کیفیت آب شرب استفاده کرد. روش Fuzzy-GA علاوه بر استفاده از مزیت‌های روش نظارت‌شده از مزیت روش فازی برای کاهش دادن عدم قطعیت نیز بهره می‌برد و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، تعیین شاخص کیفیت آب شرب دشت بیجار با استفاده از روش GQI و سپس، به‌منظور نتایج بهتر، استفاده از مزیت روش‌های الگوریتم ژنتیک و منطق فازی در تعیین کیفیت آب شرب است. با توجه به اینکه کیفیت آب شرب در سلامتی انسان‌ها نقش مهمی دارد، بنابراین تعیین کیفیت آبخوان این دشت اهمیت دارد که تجزیه و تحلیل شود. برای این منظور، شاخص کیفیت آب شرب با استفاده از روش‌های GQI، الگوریتم ژنتیک، فازی الگوریتم ژنتیک و فازی گاما تهیه شد. سپس، به‌منظور صحت‌سنجی و مقایسه نتایج ۴ روش یادشده از ضریب همبستگی و RMSE استفاده شد. روش فازی-الگوریتم ژنتیک به‌ترتیب با بیشترین و کمترین، ضریب همبستگی و RMSE نسبت به سایر روش‌ها بهترین روش ارزیابی انتخاب شد که دلیل آن را می‌توان در توانایی روش‌های نظارت‌شده و کاهش عدم قطعیت دانست. بر اساس روش شاخص کیفیت آب ۹۱/۲ درصد (۱۹۹/۶۶) کیلومترمربع از دشت کیفیت مناسب داشته و ۸/۸ درصد (۱۹/۳) کیلومترمربع باقی منطقه که بیشتر بخش‌های شمال شرقی (خروجی دشت) بوده و کیفیت قابل قبول دارد.

منابع

- [1]. Kumar K.S, Kumar P.S, Babu M.J.R, Rao C.H. Assessment and mapping of ground water quality using geographical information systems. Int. Journal of Engineering Science and Technology. 2010; 2(11): 6035-6046.
- [2]. Anonymous. WHO. Guidelines for drinking water quality, 4th ed., Recommendations, World Health Organization, Geneva. 2011. pp. 1-4.

- [15]. Jafari SM, Nikoo MR. Groundwater risk assessment based on optimization framework using DRASTIC method. Arab J Geosci.2016; 9: 742.
- [16]. Niko M, Niko M, Babajnejad T, Amiri A, Rostampour Q. Determination of water quality along the river route using evolutionary artificial neural network (Case study of Karun River, Shahid Abbaspour-Arab Assad area). Quarterly Journal of Water Science and Engineering - Islamic Azad University, Khuzestan Science and Research Branch. 2011; 1(1): 45-58. [In Persian].
- [17]. Taheri F, Jafari H, Rezaei S. Selection of an appropriate operator for the fuzzy logic method in locating groundwater resources in the Hard Shirkuh Formation, Yazd. 20th International Conference on Iran. University of Tehran. 2016. [In Persian].
- [18]. Yousefi, M. and Carrazana, E J.M. Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectively mapping. Computers and Geosciences. 2015; 74: 97-109.
- [19]. Chebotarev I. "Metamorphism of natural waters in the crust of weathering" Geochimica et Cosmochimica Acta. 1955; 8(1): 22-483.
- [20]. Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M, Machado M. A. S. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. Ecological Indicators.2009; 20: 228-237.
- [21]. Nasiri F, Maqsood. I, Huang G, Fuller N. Water Quality Index: A Fuzzy River-Pollution Decision Support Expert System. Journal of Water Resources Planing and Management.2007; 133(2): 95-105.
- [22]. Rashid Sorkhabadi M, Shahidi A, Khashei Siouki A. Spatial analysis of groundwater quality in Zaveh plain for drinking use by combining GIS and hierarchical process. Journal of Irrigation and Water Engineering. 2014; 5. (1):96-109. [in Persian].