



تحلیل فضایی پارامترهای شیمیایی مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تحلیل عاملی و مدل‌های زمین‌آماری (مطالعه موردی: دشت بیضاء- زرقان)

حسین بهزادی کریمی^{۱*}، کمال امیدوار^۲

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه یزد

۲. استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه یزد

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱۹ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۶ خرداد ۱۳۹۶

دسترسی اینترنتی: ۱ اسفند ۱۳۹۶

واژه‌های کلیدی:

پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی

تحلیل عاملی (FA)

روش‌های زمین‌آمار

دشت بیضاء- زرقان

استان فارس

چکیده

هدف از این مطالعه، تعیین مهم‌ترین پارامترهای شیمیایی مؤثر در کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت بیضاء-زرقان استان فارس با استفاده از تکنیک تحلیل عاملی و برآورد توزیع مکانی پارامترهای کیفی به کمک تحلیل‌گر زمین‌آماری در نرم‌افزار ArcGIS است. ابتدا داده‌های ۱۲ پارامتر کیفی آب مربوط به ۲۷ حلقه چاه در تابستان سال ۱۳۹۲ جمع‌آوری گردید. پس از نرمال‌سازی داده‌ها، با استفاده از روش تحلیل عاملی (FA)، سه عامل سختی، شوری و اسیدیته آب که در مجموع ۹۰٪ کل واریانس داده‌ها را شامل می‌شدند؛ استخراج گردید. سهم متغیرها در هر عامل بعد از عمل چرخش واریانس مشخص شد و از هر عامل، دو پارامتر که بیشترین همبستگی معنی‌دار را با عامل خود برقرار نمودند، تعیین گردید. بنابراین از عامل اول، پارامترهای TH و Mg، از عامل دوم، متغیرهای SAR و Na و از عامل سوم، عناصر pH و HCO₃ به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی منطقه انتخاب شدند. نتایج حاصل از روش‌های قطعی و زمین‌آماری برای برآورد پارامترهای فوق به کمک معیار آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای همه متغیرها به جز pH، روش کوکریجینگ مناسب‌ترین روش است. برای TH و Mg مدل جی-پسل، برای SAR و Na مدل رشنال کوادریک، برای HCO₃ مدل نمایی و برای pH روش معکوس فاصله وزنی به توان ۱، از کمترین خطا و بیشترین دقت نسبت به سایر روش‌های میانبایی برخوردار می‌باشند. نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی پارامترهای فوق بیانگر آن است که میزان پارامترهای TH، Mg، SAR و Na در نواحی جنوب شرقی به بیشترین و در شمال دشت به کمترین غلظت خود می‌رسد. مقدار pH در منطقه بانس واقع در شمال دشت، نسبت به سایر مناطق بیشتر است و از لحاظ غلظت HCO₃، نواحی شمال شرق و جنوب منطقه در شرایط نامناسبی قرار دارند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: h.bkarimi@chmail.ir

مقدمه

در بین منابع آب، آب‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و روزبه‌روز هم اهمیت آن بیشتر می‌شود، زیرا بعد از اقیانوس‌ها و یخ‌های قطبی، بزرگ‌ترین منابع آبی قابل استفاده کره زمین است؛ اما مصرف زیاد آب زیرزمینی باعث شده است که در بسیاری از نقاط جهان، از جمله کشور ما سطح آب زیرزمینی به شدت پائین برود، بسیاری از قنات‌ها و دیگر منابع آبی خشک شود، آب‌شور در سفره‌های آب زیرزمینی شیرین پیشروی کند (۳، ۴ و ۷). از طرف دیگر برائر مصرف زیاد در مراکز جمعیتی و صنعتی قسمت قابل توجهی از آب زیرزمینی آلوده گردد و این آلودگی یعنی غیرقابل استفاده شدن آب‌های زیرزمینی، با افزایش جمعیت و پیشرفت علم و فناوری روزبه‌روز بیشتر و گسترده‌تر می‌شود. بنابراین دو خطر بزرگ آب‌های زیرزمینی را تهدید می‌کند، استخراج و مصرف بیش‌ازحد به دلیل دستیابی سهل و آسان به آن و دیگر آلودگی شدید در نتیجه توسعه شهرها و مراکز جمعیتی (۱۱ و ۱۵). موضوع آلودگی، نه تنها در کشورهای صنعتی بلکه در کشورهای کشاورزی و در حال توسعه نیز مطرح است. به‌عنوان مثال در اکثر شهرهای ایران که آب شرب از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود باید به مسئله آلوده بودن این منابع به نیترات و سایر عناصر سمی که ممکن است توسط چاه‌های فاضلاب یا کودها و سمومی که در کشاورزی مصرف شده و همراه با آب نفوذی به لایه‌های آبدار می‌رسد توجه شود (۱۲ و ۱۳). در چند سال اخیر، مطالعاتی در خصوص ترکیب اثرات متغیرهای مختلف شیمیایی برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و ماهیت آلودگی صورت گرفته است. محققین از روش‌های متعددی برای این منظور استفاده کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های گرافیکی، تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای اشاره کرد. تحلیل عاملی یا به عبارتی تحلیل مؤلفه اصلی راهی است برای کاهش حجم داده‌ها و تبدیل متغیرهای اولیه به چند عامل محدود که بتواند بیشترین پراش متغیرهای اولیه را توجیه کند (۱۴، ۱۷، ۱۸ و ۲۴). پژوهشگران مختلفی از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی عوامل مؤثر بر

کیفیت آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند. لاو و همکاران (۲۹) از تحلیل عاملی به‌منظور اثبات ارتباط تغییرات کیفی آب زیرزمینی در اطراف یک معدن آهن و طرح دفع فاضلاب در آفریقای جنوبی با فعالیت‌های کشاورزی و معدنی بهره گرفتند. خسروی و همکاران (۵) با استفاده از تحلیل عاملی و خوشه‌ای اقدام به شناسایی مناطق همگن از نظر کیفیت آب زیرزمینی دشت قیر استان فارس پرداختند. نتایج تحلیل عاملی نشان داد که شش عامل SAR، Cl، Na، pH، SO₄ و HCO₃ به ترتیب با بالاترین بار عاملی مهم‌ترین پارامترها جهت انجام آنالیزهای خوشه‌ای می‌باشند.

مدیریت بهینه منابع آبی و حفظ و ارتقای کیفیت آن‌ها نیازمند وجود اطلاعات در زمینه موقعیت، مقدار و پراکنش فاکتورهای شیمیایی آب در یک منطقه جغرافیایی معین است. پیشرفت تکنیک‌های سنجش‌ازدور از یک‌طرف و استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در زمینه‌های مختلف کمیت و کیفیت آب از طرف دیگر، امکان دسترسی به حجم عظیمی از داده‌ها را در زمینه‌های مختلف مهندسی آب در مناطق مختلف جهان مهیا کرده است (۲۰، ۲۱، ۳۱ و ۳۲). از آنجاکه پایش کیفی با افزایش تعداد نقاط نمونه‌برداری بسیار پرهزینه است، بنابراین استفاده از روش‌های زمین‌آماری برای ارزیابی اطلاعات بسیار توسعه پیدا کرده است (۲۲). روش‌های مختلفی برای مطالعه و بررسی تغییرات مکانی پارامترهای شیمیایی آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و اطلاعات دارای دقت‌های مختلفی می‌باشند. از جمله روش‌های میانجی برای تهیه نقشه تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی می‌توان به روش‌های قطعی مانند عکس فاصله معکوس، تابع شعاعی، تخمین گر عام و تخمین گر موضعی و روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و کوکریجینگ اشاره کرد. انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی نقش ارزنده‌ای در فرایند تصمیم‌گیری و مدیریت استفاده و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند (۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۳۰).

در داخل و خارج از کشور، مطالعات مختلفی در

مکانی پارامترهای کیفی آبخوان منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل برتر انتخابی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS[®]10.3 است. انتخاب مناسب‌ترین روش و مدل جهت تخمین کیفیت آب زیرزمینی بر اساس فن اعتبارسنجی متقابل و با معیار آماری کمترین مقدار ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSe) صورت پذیرفت.

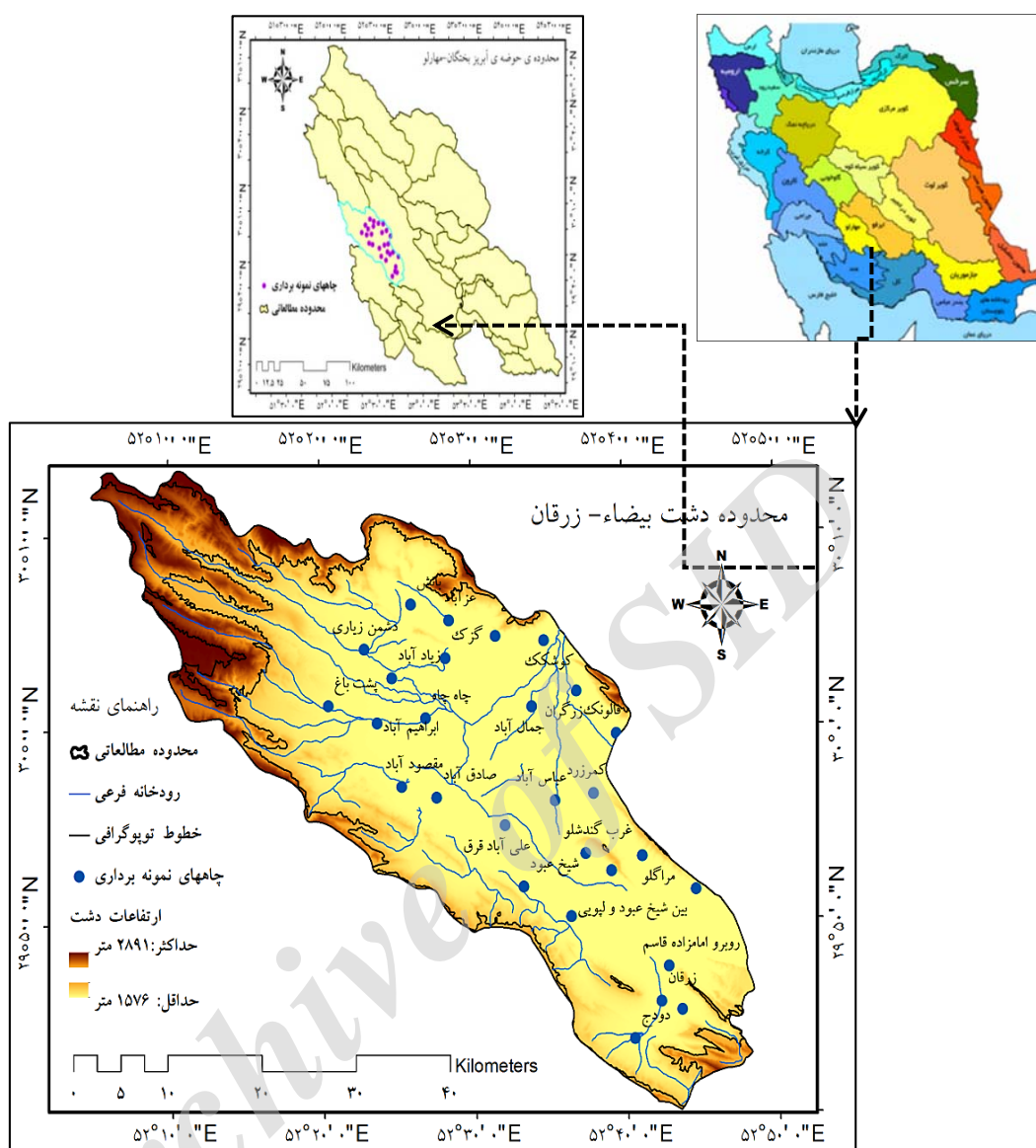
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت بیضاء- زرقان با مساحت ۱۷۳۸ کیلومترمربع در غرب حوزه آبریز بختگان- مهارلو قرار دارد و بین عرض‌های ۲۹°۴۰' تا ۳۰°۱۳' شمالی و طول ۵۲°۰۵' تا ۵۲°۴۸' شرقی واقع شده است. ۹۵۴ کیلومترمربع محدوده مورد مطالعه را دشت و ۷۸۴ کیلومترمربع آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. بلندترین نقطه منطقه حدود ۲۹۷۳ متر، کمترین ارتفاع منطقه ۱۵۶۶ متر و ارتفاع متوسط دشت ۱۹۱۲ متر از سطح دریا است. در بررسی هوا و اقلیم منطقه از آمار ایستگاه هواشناسی زرقان استفاده شده است. میانگین حداقل دما ۷/۳، میانگین حداکثر دما ۲۴/۶ و میانگین متوسط سالانه دما ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی سالانه دشت در دوره ۲۰ ساله ۳۴۱/۸ میلی‌متر برآورد گردیده است. از نظر زمین‌شناسی این منطقه در ناحیه زاگرس چین‌خورده ملایم قرار گرفته و شامل سازندهای زمین‌شناسی اواخر دوران دوم (کرتاسه) تا رسوبات دوران چهارم و عهد حاضر است. روند چین‌خوردگی ارتفاعات منطقه از روند عمومی چین‌خوردگی زاگرس (شمال غربی- جنوب شرقی) تبعیت می‌کند. شکل ۱ موقعیت منطقه را نشان می‌دهد. تعداد چاه‌های نمونه‌برداری در داخل محدوده مورد مطالعه ۲۷ حلقه چاه است.

خصوص کاربرد روش‌های درون‌یابی برای مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است؛ کرسیک (۲۸) روش کریجینگ را از میان دیگر روش‌های زمین‌آماری، به‌عنوان بهترین و قوی‌ترین ابزار برای میانابی داده‌ها و تهیه نقشه‌های آب زیرزمینی معرفی کرد. براس و هوورنیک (۲۳) برای تعیین الگوی بهینه نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه نوسانات سطح آب زیرزمینی از روش کریجینگ جهانی استفاده کردند. شعبانی (۹) روش‌های مختلف زمین‌آماری را به‌منظور تهیه نقشه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت نیریز ارزیابی نمود و به این نتیجه رسید که در بین روش‌های معین، روش تابع شعاعی (RBF) و در بین روش‌های زمین‌آماری، روش کریجینگ ساده (SK) برای تهیه نقشه‌های تغییرات شوری و تغییرات نیترات مناسب هستند. زاهدی فر و همکاران (۸) به پهنه‌بندی ویژگی‌های شیمیایی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت فسا با استفاده از روش‌های زمین‌آماری اقدام نمودند و روش کریجینگ معمولی نقطه‌ای، روش تخمین مناسب شناخته شد. رستم‌زاده و همکاران (۶) با استفاده از ترکیب مدل‌های زمین‌آماری و تصمیم‌گیری چندمعیاری در محیط GIS اقدام به پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی قابل شرب دشت اردبیل نمودند و نتیجه گرفتند که تقریباً ۳۴٪ آب زیرزمینی منطقه از لحاظ شرب در حد مطلوب است که در قسمت شرقی دشت قرار دارد. ولی‌زاده کامران و همکاران (۱۹) به تحلیل مکانی تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی دشت شیرامین استان آذربایجان شرقی با استفاده از مناسب‌ترین روش زمین‌آماری پرداختند و نتیجه گرفتند که روش کریجینگ ساده به دلیل R بالاتر و RMSe کمتر مناسب‌ترین روش است.

هدف از این تحقیق، استفاده از فن تحلیل عاملی به‌منظور کاهش حجم داده‌ها و تعیین مهم‌ترین عناصر شیمیایی مؤثر در کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت بیضاء- زرقان استان فارس، سنجش کارایی روش‌های مختلف میانابی و درنهایت پهنه‌بندی



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش چاههای نمونه برداری واقع در دشت بیضاء- زرقان

روش تحقیق

در این پژوهش، از داده‌های اندازه‌گیری شده ۱۲ پارامتر کیفی آب با نمونه‌گیری از ۲۷ حلقه چاه پیزومتری دشت بیضاء-زرقان که توسط سازمان آب منطقه‌ای فارس در فصل تابستان سال ۱۳۹۲ تهیه شده بود، استفاده گردید. این ویژگی‌های شیمیایی شامل سختی کل آب (TH)، نسبت جذبی سدیم (SAR)، پتاسیم (K)، سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، کلسیم (Ca)، سولفات (SO₄)، کلر (Cl)، بی‌کربنات (HCO₃)، اسیدیته

(pH)، مواد جامد محلول در آب (TDS) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) است، بنابراین ماتریسی به ابعاد ۲۷×۱۲ شامل ۱۲ پارامتر شیمیایی و ۲۷ حلقه چاه نمونه‌برداری تشکیل شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) در محیط نرم‌افزاری SPSS بررسی شد و در مواردی که انحراف از توزیع نرمال وجود داشت با استفاده از تبدیل لگاریتمی، توزیع داده‌ها نرمال گردید. همچنین به علت تفاوت در مقیاس اندازه‌گیری متغیرها

نمای تجربی از ریشه میانگین مربع خطای استاندارد (RMSs) که در حالت ایده‌آل نزدیک به یک محاسبه می‌شود و استحکام ساختار فضایی قوی‌تر استفاده شد. با کمک فن اعتبارسنجی متقابل و بر اساس معیار آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSe) که میزان دقت را نشان می‌دهد، مناسب‌ترین روش میانبایی از میان روش‌های قطعی یعنی معکوس فاصله وزنی و تابع شعاع محور و روش‌های زمین‌آماري کریجینگ و کوکریجینگ، تعیین و انتخاب شد. پس از انجام این مراحل و بر اساس بهترین مدل انتخابی، نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم و تفسیر گردید. مراحل انجام تحقیق، در شکل ۲ آورده شده است.

از نمره استاندارد (Standar dized Value) داده‌ها استفاده گردید.

پس از کنترل کیفی داده‌ها، به‌منظور تشخیص مناسب بودن داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی از آزمون کرویت بارتلت و آماره KMO استفاده شد. به‌وسیله تکنیک تحلیل عاملی (Factor Analysis) حجم داده‌ها کاهش یافته و مهم‌ترین پارامترهای شیمیایی در هر عامل تعیین گردید.

به‌منظور تشریح پیوستگی مکانی متغیرها، نیم تغییرنمای داده‌ها رسم گردید. مؤلفه‌های نیم تغییرنمای مدل‌های مختلف مبتنی بر روش‌های زمین‌آماري کریجینگ ساده و کوکریجینگ ساده با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.3 به دست آمد. به منظور انتخاب مدل مناسب برای برآزش بر روی نیم تغییر



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

متغیرهای وابسته به هم را به‌صورت تعداد کوچک‌تری از ابعاد پنهان یا مکنون (عامل‌ها) امکان‌پذیر می‌سازد، بطوریکه در آن کمترین میزان از دست رفتن اطلاعات وجود داشته باشد. این روش به بررسی همبستگی درونی تعداد زیادی از متغیرها

تکنیک تحلیل عاملی

یکی از روش‌های آماری برای تجزیه اطلاعات موجود در مجموعه داده‌ها، روش تجزیه عمل‌ها یا تحلیل عاملی (FA) است. تحلیل عاملی فن است که کاهش تعداد زیادی از

در زمین‌آمار، برای بررسی ساختار تغییرپذیری متغیر مورد مطالعه نسبت به فاصله (مکانی یا زمانی) لازم است تابع نیم تغییرنمای مناسب برقرار شود. نیم تغییرنما یا واریوگرام، واریانس وابسته به فاصله است که با نماد γ نشان داده می‌شود. اگر جمعاً تعداد $n(h)$ زوج نمونه، $Z(x)$ متغیر مشاهده شده و $Z(x+h)$ متغیر مشاهده شده که با فاصله h از $Z(x)$ واقع شده‌اند در دست باشد. نیم تغییرنمای تجربی $\gamma(h)$ مطابق رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad [1]$$

هر نیم تغییرنما دارای سه مشخصه اصلی، اثر قطعه‌ای (Nugget Effect)، آستانه (Sill) و شعاع تأثیر (Range of Influence) است. مقدار نیم تغییرنما به ازای $h = 0$ اثر قطعه‌ای نامیده می‌شود که معمولاً ناشی از خطاهای نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل داده‌ها و یا به دلیل تغییرات کوچک مقیاس (تغییراتی که در فواصلی کمتر از کوچک‌ترین فاصله نمونه‌برداری شده رخ می‌دهد) است. با افزایش h مقدار نیم تغییرنما تا فاصله معینی که دامنه یا شعاع تأثیر می‌نامند، افزایش می‌یابد و پس از آن به حد ثابتی می‌رسد که به آن آستانه گفته می‌شود.

روش‌های میانمایی

روش معکوس فاصله وزنی (IDW; Inverse Distance)

(Weighted) بر این اصل استوار است که در یک سطح میانمایی اثر یک پارامتر بر نقاط اطراف آن نقطه یکسان نیست و نقاط نزدیک، بیشتر و نقاط دور، کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند و هر چه فاصله از مبدأ افزایش می‌یابد، اثر کمتر خواهد شد. رابطه ۲، برآورد در روش معکوس فاصله وزنی را نشان می‌دهد.

$$Z(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^n x_j \frac{1}{d_{ij}^\alpha} Z(x_j)}{\sum_{j=1}^n x_j \frac{1}{d_{ij}^\alpha}} \quad [2]$$

در این رابطه؛ d_{ij} فاصله بین نقطه تخمین تا هر یک از نمونه‌های واقع در همسایگی آن، $Z(x_i)$ مقدار تخمین خاصیت

می‌پردازد و در نهایت آن‌ها را در قالب عامل‌های عمومی محدودی دسته‌بندی و تبیین می‌کند. بنابراین عمده‌ترین هدف تحلیل عاملی، کاهش حجم داده‌ها و تعیین مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در شکل‌گیری پدیده‌ها است.

به منظور تشخیص مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی از دو روش (Kaiser Meyer Olkin) KMO و آزمون بارتلت استفاده می‌شود. با توجه به این که هدف تحلیل عاملی خلاصه کردن متغیرها در تعدادی عامل است، در نتیجه باید روش استخراج عامل‌ها و معیار تعیین آن‌ها مشخص شود.

در اینجا از روش استخراج عاملی مؤلفه‌های اصلی (PC; Principal Components) استفاده شده است. در مرحله بعد برای دستیابی به ماتریس عاملی ساده و از نظر تئوریک معنادار و قابل تفسیرتر، عامل‌ها باید به دور مبدأ چرخش داده شوند، تا موقعیت جدید کسب کنند. دو نوع چرخش وجود دارد که شامل چرخش متعامد و چرخش متمایل است. در اینجا از روش چرخش متعامد با رویکرد واریماکس (Varimax) استفاده شد. برای تفسیر عامل‌ها باید مشخص شود که کدام یک از بارهای عاملی باید به عنوان مقادیر معنی‌دار لحاظ شوند.

برای اتخاذ این تصمیم بدین صورت عمل می‌شود که هر چه میزان بار عاملی بیشتر باشد، سطح معنی‌داری آن‌ها در تفسیر ماتریس عاملی افزایش می‌یابد. بارهای عاملی بزرگ‌تر از ± 0.3 ، معنی‌دار و بارهای عاملی که بزرگ‌تر از ± 0.4 باشند، دارای سطح معنی‌داری بالا و بارهای عاملی که بزرگ‌تر از ± 0.5 باشند بسیار معنی‌دار هستند. بنابراین در تحلیل عاملی متغیری مهم است و به عنوان عامل تعیین می‌شود که تغییرات آن بالا باشد و واریانس بالایی داشته باشد (۱).

نیم تغییرنما

به منظور تشریح پیوستگی مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه، اقدام به ترسیم نیم تغییرنمای (Variogram) عناصر شیمیایی که دارای بالاترین وزن عاملی در هر عامل بودند در محیط نرم‌افزار ArcGIS گردید.

می‌شود.

$$Z_v^*(u_0) = \sum_{i=1}^N [a_i Z_v(u_i) + \beta_i Z_w(u_i)] \quad [5]$$

در این رابطه؛ $Z_v^*(u_0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_0 است. a_i وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ای متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_i است. β_i وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده شده متغیر کمکی Z_w در موقعیت u_i و N تعداد مشاهدات در اطراف نقطه مورد تخمین است. در این مطالعه، برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به نقشه سطح و تولید نقشه‌های تغییرات مکانی هر یک از پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی دشت بیضاء-زرقان، از روش‌های قطعی مانند معکوس فاصله وزنی (IDW) با توان بهینه و شبکه توابع پایه شعاعی (RBF) با ۵ مدل مختلف و از روش‌های زمین‌آمار مانند، کریجینگ ساده (SK) و کوکریجینگ ساده (SCOK) هرکدام با ۱۱ مدل در نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.3 استفاده گردید.

معیار ارزیابی و صحت‌سنجی روش‌ها

به منظور انتخاب مدل مناسب برای برازش بر روی نیم تغییر نمای تجربی از فن اعتبارسنجی متقابل (Cross Validation) و بر اساس مقدار ریشه میانگین مربع خطای استاندارد (Standardized RMSs; Root Mean Square) و استحکام ساختار فضایی استفاده شد. مقدار ریشه میانگین مربع خطای استاندارد با نزدیک شدن به یک، نشان‌دهنده دقت بالای تخمین است. مقدار RMSs از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$RMSs = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{Z}(x_i) - Z(x_i)| \quad [6]$$

در این رابطه؛ $\bar{Z}(x_i)$ مقدار برآورد شده متغیر موردنظر، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر و n تعداد داده‌ها است. همچنین از نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر (Co/ C+Co) به عنوان شاخصی از چگونگی قدرت ساختار مکانی در متغیرها استفاده می‌شود. وقتی این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد؛ متغیر موردنظر دارای ساختار مکانی قوی است.

موردنظر در نقطه x_i ، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده خاصیت موردنظر در نقطه x_i و α توان عکس فاصله است.

روش تابع پایه شعاعی (RBF; Radial Basis Functions)

یک تابع عمومی را به کار می‌گیرد که وابسته به فاصله بین نقاط درونیابی شده و نمونه‌برداری شده است. تعریف ریاضی این روش در رابطه ۳ آورده شده است.

$$Z(x) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x) + \sum_{i=1}^n b_j \Psi(d_j) \quad [3]$$

در این رابطه؛ $\Psi(d_j)$ تابع پایه شعاعی، b_j فاصله بین نقاط نمونه‌برداری شده و پیش‌بینی شده نقطه x را نشان می‌دهد. $f_i(x)$ روند تابع و عضو اساسی برای چندجمله‌ای‌هایی با درجه کمتر از m است. روش تابع شعاعی خود، برحسب نوع تابع دارای ۵ نوع اسپیلاین کاملاً منظم، اسپیلاین کششی، اسپیلاین چند ربعی، اسپیلاین چند ربعی معکوس و اسپیلاین صفحه‌ای نازک است.

روش کریجینگ (K; Kriging) یک روش برآورد

زمین‌آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن‌دار استوار است؛ بطوریکه می‌توان گفت این روش بهترین برآورد کننده خطی ناریب است. در این روش با استفاده از نقاط معلوم و نیم تغییر نما، مقادیر مجهول برآورد می‌گردند. رابطه کلی کریجینگ برای برآورد مقادیر یک متغیر به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود.

$$Z(S_0) = \sum_{i=0}^N \lambda_i Z(S_i) \quad [4]$$

در این رابطه؛ ضریب λ_i مجموعه‌ای از وزن‌ها است که به نحوی انتخاب می‌شوند تا $Z(S_0)$ برآورد ناریب با حداقل خطا از $Z(S_i)$ باشد.

تخمین گر کوکریجینگ (COK; COKriging) همان

کریجینگ توسعه یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده‌اند. با بهره‌گیری از مقادیر متغیر ثانویه یا کمکی و با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به همبستگی دوجانبه بین متغیرها می‌توان تخمین مناسب و دقیق‌تری از متغیر اصلی به دست آورد. تخمین گر کوکریجینگ مطابق رابطه ۵ محاسبه

در این رابطه؛ $\bar{Z}(x_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه x_i و $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه x_i و n تعداد داده‌ها است.

نتایج

در اغلب آزمون‌های پارامتری مفروضات مقدماتی بسیاری وجود دارد که تا این مفروضات تأمین نشوند، نتایج به‌دست‌آمده از آزمون، نامعتبر خواهد بود. در میان این مفروضات مهم‌ترین و شایع‌ترین فرض، فرض نرمال بودن داده‌هاست. نتایج حاصل از نرمال بودن داده‌ها بعد از تبدیل لگاریتمی با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در سطح ۵ درصد نشان داد که توزیع داده‌ها نرمال می‌باشد (جدول ۱).

بین ۰/۷۵ تا ۰/۲۵ ساختار مکانی متوسط بوده و هنگامی که بزرگ‌تر از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی ضعیف است (۲۹). همبستگی قوی مکانی به این معنی است که در دامنه تأثیر می‌توان متغیر موردنظر را تخمین زد. معیارهای متعددی نیز برای ارزیابی کارایی روش‌های میانجی وجود دارد؛ که کاربردی‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSe). در این تحقیق با کمک فن اعتبارسنجی متقابل و بر اساس ریشه دوم میانگین مربعات خطا، مناسب‌ترین روش برای ترسیم پهنه‌های موردنظر انتخاب گردید. نحوه محاسبه آن مطابق رابطه ۷ است:

$$RMSe = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Z}(x_i) - Z(x_i))^2}{n} \right]} \quad [7]$$

جدول ۱. مقادیر sig. حاصل از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌ها بعد از تبدیل لگاریتمی

ردیف	متغیر کیفی	واحد اندازه‌گیری	مقدار sig	ردیف	متغیر کیفی	واحد اندازه‌گیری	مقدار sig
۱	TH	میلی گرم در لیتر	۰/۲۸۸	۷	SO ₄	میلی اکی والان در لیتر	۰/۵۰۲
۲	SAR	^{۱/۵} (میلی اکی والان در لیتر)	۰/۵۹۴	۸	Cl	میلی اکی والان در لیتر	۰/۹۵۱
۳	K	میلی اکی والان در لیتر	۰/۷۶۷	۹	HCO ₃	میلی اکی والان در لیتر	۰/۷۵۱
۴	Na	میلی اکی والان در لیتر	۰/۶۱۴	۱۰	pH	میلی اکی والان در لیتر	۰/۳۷۸
۵	Mg	میلی اکی والان در لیتر	۰/۷۷۶	۱۱	TDS	میلی گرم در لیتر	۰/۷۲۹
۶	Ca	میلی اکی والان در لیتر	۰/۳۷۹	۱۲	EC	میکرو موس بر سانتیمتر	۰/۶۶۲

روش تحلیل عاملی

مناسب هستند. با توجه به اینکه مقدار sig. (احتمال) آزمون بارتلت کوچک‌تر از ۵ درصد می‌باشد، تحلیل عاملی برای شناسایی ساختار (مدل عاملی) مناسب است، و بین متغیرها همبستگی معنی‌دار وجود دارد (جدول ۲).

مقادیر داده‌های مربوط به ۱۲ پارامتر شیمیایی و ۲۷ حلقه چاه پیژومتری را وارد نرم‌افزار SPSS کرده و آزمون همبستگی داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی انجام گرفت. چون مقدار آماره KMO برابر ۰/۷۹۱ است؛ پس داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی

جدول ۲. نتایج آزمون کرویت بارتلت و آماره KMO

آزمون KMO	۰/۷۹۱
کای اسکوار	۸۰۹/۲۵۷
درجه آزادی	۶۶
سطح معنی داری (sig.)	۰/۰۰۰

به دست آمده که با روش واریانس چرخش داده شده اند، نشان می دهند که عامل های سختی آب، شوری آب و اسیدیته آب به ترتیب هر کدام ۴۴/۴۶، ۳۴/۷۳ و ۱۰/۹۱ درصد و در مجموع ۹۰/۱ درصد پراش داده ها را تبیین می نمایند.

نتایج مقادیر ویژه و واریانس متناظر با عامل ها نشان می دهد که مقدار ویژه هر عامل، نسبتی از واریانس کل متغیرها است که توسط آن عامل تبیین می شود. همان گونه که مشاهده می شود سه عامل قابلیت تبیین واریانس ها را دارند. عامل های

جدول ۳. درصد واریانس و مقادیر ویژه عامل های مختلف بعد از عمل چرخش

عامل کیفی	مقادیر ویژه اولیه	مقادیر ویژه عامل هایی که بزرگ تر از ۰/۵ می باشند (بعد از عمل چرخش)
	کل	درصد واریانس
۱	۸/۳۴۰	۴۴/۴۶۳
۲	۱/۴۲۶	۷۹/۱۹۷
۳	۱/۰۴۶	۹۰/۱۰۹
۴	۰/۶۲۳	-
۵	۰/۲۸۶	-
۶	۰/۲۰۴	-
۷	۰/۰۳۰	-
۸	۰/۰۲۶	-
۹	۰/۰۰۹	-
۱۰	۰/۰۰۵	-
۱۱	۰/۰۰۴	-
۱۲	۲/۱۹۱×۱۰ ^{-۶}	-

همان گونه که مشاهده می شود؛ پارامترهای کیفی TH و Mg به ترتیب با میزان ۰/۹۳۶ و ۰/۹۱۷ بیشترین ضریب همبستگی با عامل اول، متغیرهای SAR و Na به ترتیب با مقدار ۰/۹۴۶ و ۰/۸۹۸ بیشترین همبستگی معنی دار با عامل دوم و متغیرهای pH و HCO₃ نیز به ترتیب با مقدار ۰/۹۱۱ و ۰/۶۵۰- بیشترین همبستگی معنی دار را با عامل سوم برقرار می کنند. بنابراین از عامل اول پارامترهای TH و Mg، از عامل دوم متغیرهای SAR

برای تفسیر عامل ها باید مشخص شود که کدام یک از بارهای عاملی باید به عنوان مقادیر معنی دار لحاظ شوند، بنابراین هر چه میزان بار عاملی بیشتر باشد سطح معنی داری آن ها در تفسیر ماتریس عاملی افزایش می یابد. جدول ۴ سهم متغیرها یا بار عاملی را در هر عامل بعد از عمل چرخش (چرخش واریانس) نشان می دهد. هر متغیر در عاملی قرار می گیرد که با آن عامل همبستگی بالای معنی دار داشته باشد.

و Na و از عامل سوم عناصر pH و HCO_3 به عنوان مهم ترین پارامترهای مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی منطقه انتخاب شدند تا با استفاده از روش های مختلف میانیابی، نقشه های پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی منطقه تهیه شود.

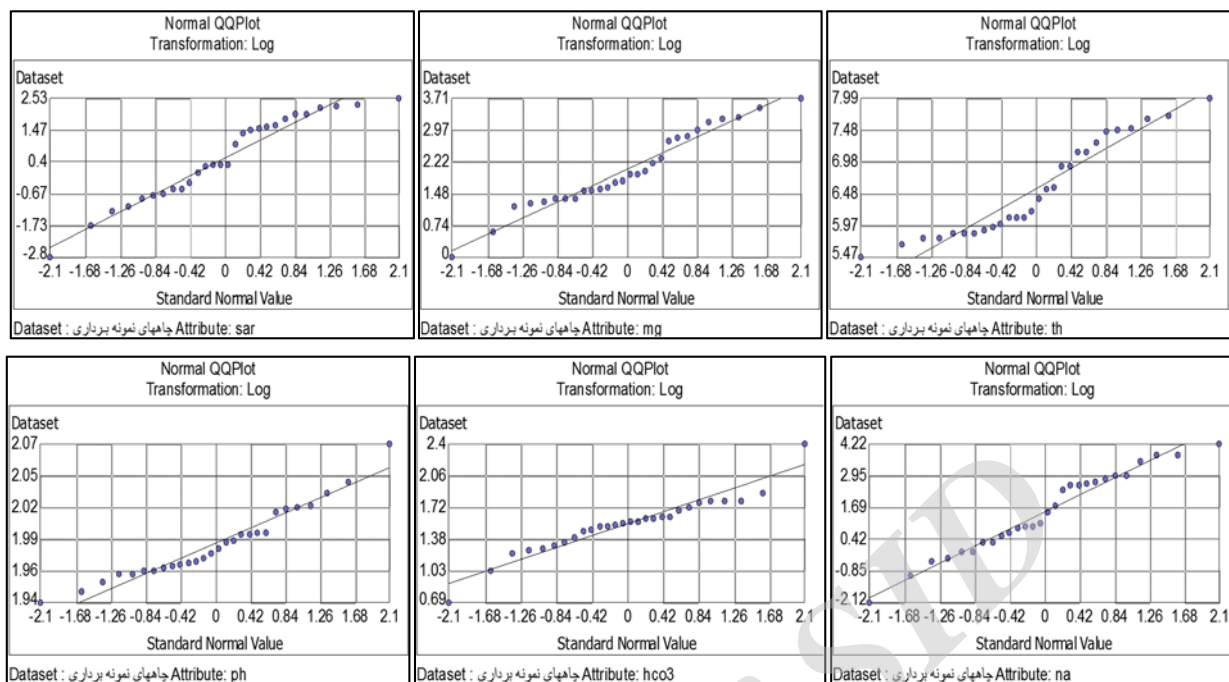
جدول ۴. سهم متغیرها یا بار عاملی در هر عامل با چرخش واریماکس

پارامترهای کیفی آب زیرزمینی	عاملها		
	اول	دوم	سوم
TH	۰/۹۳۶	۰/۳۱۷	۰/۰۶۳
SAR	۰/۱۹۸	۰/۹۴۶	۰/۰۰۳
K	۰/۷۳۱	۰/۶۶۱	۰/۰۶۹
Na	۰/۳۸۹	۰/۸۹۸	۰/۰۱۸
Mg	۰/۹۱۷	۰/۱۵۸	۰/۱۱۷
Ca	۰/۷۹۰	۰/۴۴۱	-۰/۰۰۷
SO_4	۰/۶۸۴	۰/۵۴۰	۰/۰۱۰
Cl	۰/۶۹۳	۰/۶۵۹	۰/۱۴۸
HCO_3	-۰/۴۷۲	۰/۲۶۸	-۰/۶۵۰
pH	-۰/۰۹۳	۰/۱۹۷	۰/۹۱۱
TDS	۰/۷۳۱	۰/۶۶۸	۰/۰۸۷
EC	۰/۷۴۵	۰/۶۵۴	۰/۰۷۸

روش های درونیابی

نرمال بودن داده ها شرط استفاده از روش های زمین آمار است. با بررسی آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مشخص شد که داده ها از توزیع نرمال تبعیت نمی کنند؛ به همین دلیل داده ها به لگاریتم داده ها منتقل گردید تا از این طریق داده ها از توزیع نرمال تبعیت کنند. شکل ۳ نمودار QQPlot لگاریتم

پارامتری های شیمیایی سختی کل آب و منیزیم برای عامل اول، نسبت جذبی سدیم و سدیم برای عامل دوم و اسیدیت و بی کربنات را برای عامل سوم نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود داده ها حول یک خط راست برازش یافته اند و از شرایط نرمال تبعیت می کنند. بنابراین شرط نرمال بودن توزیع داده ها برای استفاده از روش های زمین آمار برقرار است.



شکل ۳. نمودار QQPlot لگاریتم پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی

اثر قطعه‌ای در بین ۶ پارامتر کیفی مورد بررسی از مقدار ۰ تا ۰/۷۹ نوسان دارد. درصد اثر قطعه‌ای به آستانه در پارامتر کیفی SAR با روش کریجینگ و مدل دایره‌ای بیشترین (۶/۶۸ درصد) و در متغیرهای Mg با روش کریجینگ و مدل جی-بسل، pH با روش کوکریجینگ و مدل نمایی و HCO_3 با دو روش کریجینگ نمایی و کوکریجینگ نمایی، کمترین (صفر درصد) بود. که به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی مکانی متوسط و قوی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده است. بنابراین از شش پارامتر مورد مطالعه، ۱۰ مورد وابستگی مکانی قوی و ۱ مورد همبستگی مکانی متوسط را نشان دادند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در متغیر pH با روش کریجینگ و مدل نمایی به دلیل آنکه مقدار آستانه تأثیر آن صفر است، درصد اثر قطعه‌ای به آستانه برای آن تعریف نشده و نمی‌توان برای آن کلاس وابستگی مکانی در نظر گرفت.

پس از بررسی و حذف روند داده‌ها، مؤلفه‌های نیم تغییرنمای مدل‌های مختلف مبتنی بر روش‌های زمین‌آماري کریجینگ ساده و کوکریجینگ ساده با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد (جدول ۵). به منظور انتخاب مدل مناسب برای برازش بر روی واریوگرام تجربی با روش تعیین اعتبار و با استفاده از تابع ریشه میانگین مربع خطای استاندارد (RMSs) و استحکام ساختار فضایی قوی‌تر استفاده شد. در حالت ایده‌آل، ریشه میانگین مربع خطای استاندارد (RMSs) نزدیک به یک محاسبه می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ برای تمامی پارامترهای کیفی مقدار ریشه میانگین مربع خطای استاندارد در روش زمین‌آماري کوکریجینگ نسبت به مقادیر RMSs در روش کریجینگ به یک نزدیک‌تر است؛ بنابراین مدل‌های تخمینی در روش کوکریجینگ، از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار است. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه را می‌توان برای ارزیابی ساختار فضایی داده‌ها مورد بررسی قرار داد. مقدار

جدول ۵. مؤلفه‌های نیم تغییرنمای مناسب برازش شده برای پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی دشت بیضاء- زرقان

پارامترهای کیفی	روش‌های زمین آماری	مناسب‌ترین مدل تخمینی	اثر قطعه‌ای Co	آستانه تأثیر C+Co	شعاع تأثیر	درصد اثر قطعه‌ای/آستانه Co/ C+Co	کلاس وابستگی مکانی	مقدار RMSs
TH	کریجینگ	رشنال کوادریک	۰/۰۰۰۵	۰/۵۴۲	۱۲۲۷۰	۰/۰۹	قوی	۰/۸۵
Mg	کوکریجینگ	جی بسل	۰/۰۲	۰/۵۱۸	۱۱۸۷۰	۳/۸	قوی	۱/۱۲
	کریجینگ	جی-بسل	۰	۰/۸۰۱	۱۰۸۲۴	۰	قوی	۱/۲۶
SAR	کوکریجینگ	جی-بسل	۰/۰۷	۰/۷۰۸	۱۱۸۳۶	۹/۸	قوی	۰/۷۹
	کریجینگ	دایره‌ای	۰/۷۹	۱/۱۵۰	۱۹۹۶۰	۶۸/۶	متوسط	۰/۵۲
Na	کوکریجینگ	رشنال کوادریک	۰/۲۳	۱/۷۲۱	۲۰۱۴۳	۱۳/۳	قوی	۰/۶۱
	کریجینگ	رشنال کوادریک	۰/۰۰۲	۲/۶۵۲	۱۸۹۷۳	۰/۰۷	قوی	۰/۳۶
pH	کوکریجینگ	رشنال کوادریک	۰/۰۰۲	۲/۶۷۴	۲۰۱۴۳	۰/۰۷	قوی	۰/۴۶
	کریجینگ	نمایی	۰/۰۰۰۹	۰	۵۶۸۰۶	تعریف نشده	تعریف نشده	۱/۲۹
HCO ₃	کوکریجینگ	نمایی	۰	۰/۰۰۰۵	۱۰۶۲۶	۰	قوی	۱/۲۷
	کوکریجینگ	نمایی	۰	۰/۱	۱۰۱۳۱	۰	قوی	۰/۸۹

نتایج حاصل از همبستگی بین عناصر شیمیایی نشان‌دهنده ارتباط بسیار خوب TH با پتاسیم، منیزیم، کلسیم، سولفات، کلر، مواد جامد محلول در آب و هدایت الکتریکی است که همگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار می‌باشند. عنصر شیمیایی Mg با سختی کل آب، پتاسیم، سولفات، کلر، مواد جامد محلول در آب و هدایت الکتریکی همبستگی قوی و معنی دار دارد. متغیر SAR ارتباط خوب و معنی داری با پتاسیم، سدیم، کلر، مواد جامد محلول در آب و هدایت الکتریکی برقرار می‌کند. پارامتر شیمیایی Na همبستگی قوی و مثبتی با نسبت جذبی سدیم، پتاسیم، کلر، مواد جامد محلول در آب و هدایت الکتریکی دارد، اما پارامترهای pH و HCO₃ به دلیل محدوده تغییرات بسیار کم در نمونه آب زیرزمینی همبستگی خوبی با دیگر عناصر ندارند.

در روش کوکریجینگ، پس از تشکیل ماتریس همبستگی، برای برآورد پارامترهای کیفی از متغیر کمکی یا ثانویه استفاده شد که دارای بیشترین ضریب همبستگی با عامل موردنظر است (جدول ۶). بنابراین برای برآورد غلظت سختی کل آب از پارامتر شیمیایی Mg ($r=0/92$)، برای برآورد غلظت پارامتر منیزیم از متغیر TH ($r=0/92$)، برای برآورد متغیر نسبت جذبی سدیم از متغیر Na ($r=0/97$)، برای برآورد پارامتر شیمیایی سدیم از متغیر SAR ($r=0/97$)، استفاده گردید. گرچه متغیرهای pH و HCO₃ ارتباط قوی و معنی داری با سایر عناصر شیمیایی برقرار نکردند (همبستگی تقریباً ضعیف و منفی) اما با ترسیم نیم تغییرنمای متقابل پارامتر اسیدیته با بی‌کربنات و نیز بی‌کربنات با منیزیم در مدل نمایی، همبستگی مکانی قابل قبولی را نشان دادند، اما در دیگر مدل‌های کوکریجینگ همبستگی مکانی مشاهده نشد.

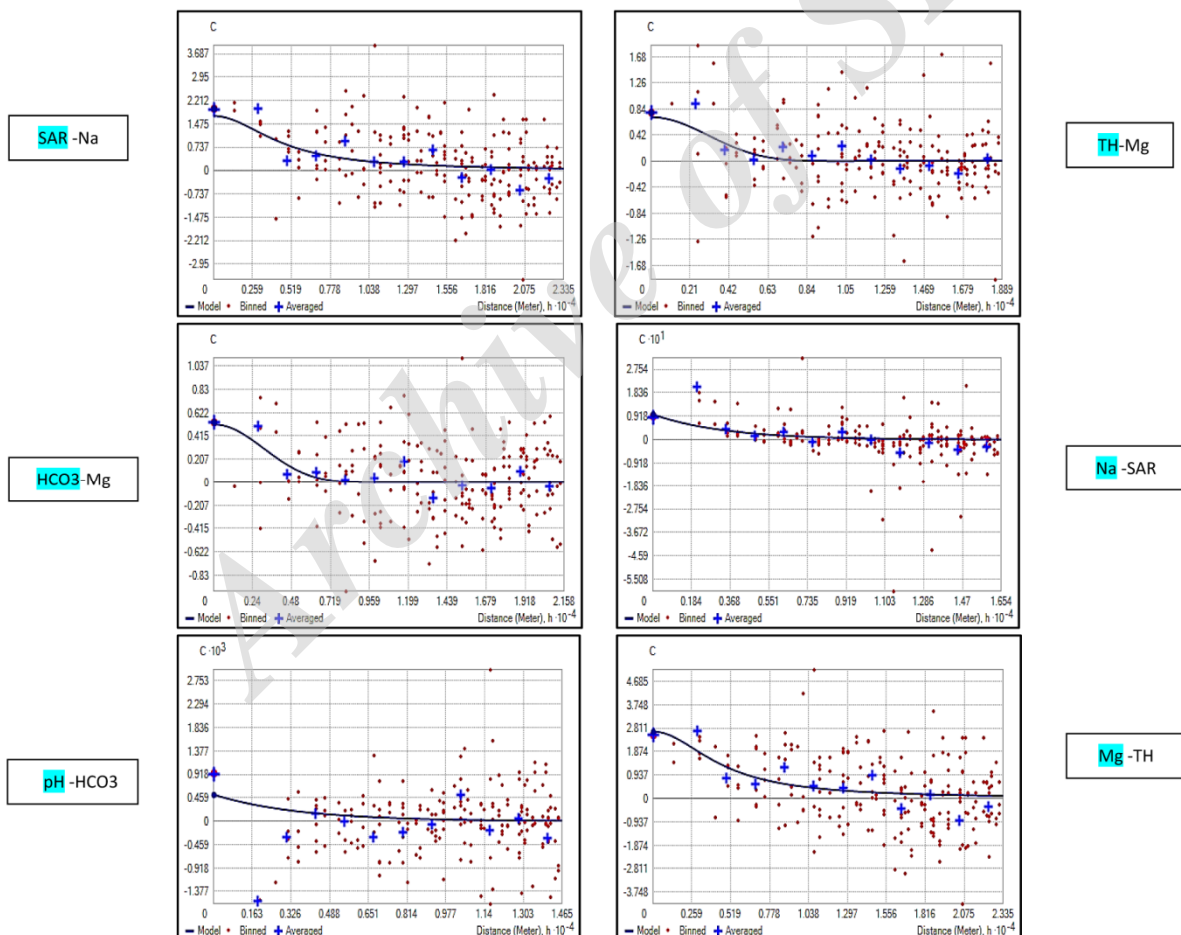
جدول ۶. ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت بیضاء- زرقان

EC	TDS	pH	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	SAR	TH	پارامتر کیفی
۰/۹۱**	۰/۹۰**	۰/۰۶	-۰/۳۴	۰/۸۷**	۰/۸۱**	۰/۸۹**	۰/۹۲**	۰/۶۲**	۰/۸۹**	۰/۴۶*	۱	TH
۰/۷۹**	۰/۷۸**	۰/۱۰	-۰/۳۷	۰/۷۴**	۰/۷۸**	۰/۶۶**	۱	۰/۴۸**	۰/۷۹**	۰/۳۱	۰/۹۲**	Mg
۰/۷۵**	۰/۷۶**	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۷۵**	۰/۶۰**	۰/۵۶**	۰/۳۱	۰/۹۷**	۰/۷۷**	۱	۰/۴۶*	SAR
۰/۸۷**	۰/۸۷**	۰/۰۹	-۰/۰۵	۰/۸۵**	۰/۷۱**	۰/۶۹**	۰/۴۸**	۱	۰/۸۸**	۰/۹۷**	۰/۶۳**	Na
۰/۱۳	۰/۱۵	۱	-۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۰۰۸	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۶	PH
-۰/۲۱	-۰/۱۹	-۰/۳۱	۱	-۰/۲۴	-۰/۰۷	-۰/۲۷	-۰/۳۷	-۰/۰۵	-۰/۲۲	۰/۰۲	-۰/۳۴	HCO ₃

* همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی دار است. ** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.

ساختار فضایی داده‌ها را نمایش می‌دهد.

شکل ۴ واریوگرام‌های متقابل عامل‌های کیفی آب زیرزمینی دشت بیضاء- زرقان را نشان می‌دهد. هر واریوگرام



شکل ۴. واریوگرام‌های متقابل مربوط به پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی دشت بیضاء- زرقان

SAR و Na مدل رشنال کوادریک به ترتیب با مقدار خطای ۱/۵۵ و ۴/۷۷ و برای متغیر pH مدل معکوس فاصله وزنی با توان بهینه (توان ۱) با مقدار خطای به ترتیب با مقدار خطای ۰/۲۴ و برای عنصر HCO_3 مدل نمایی با مقدار خطای ۱/۲۷ از بیشترین دقت و کمترین خطا نسبت به سایر روش‌های میانمایی برخوردار می‌باشند (جدول ۷).

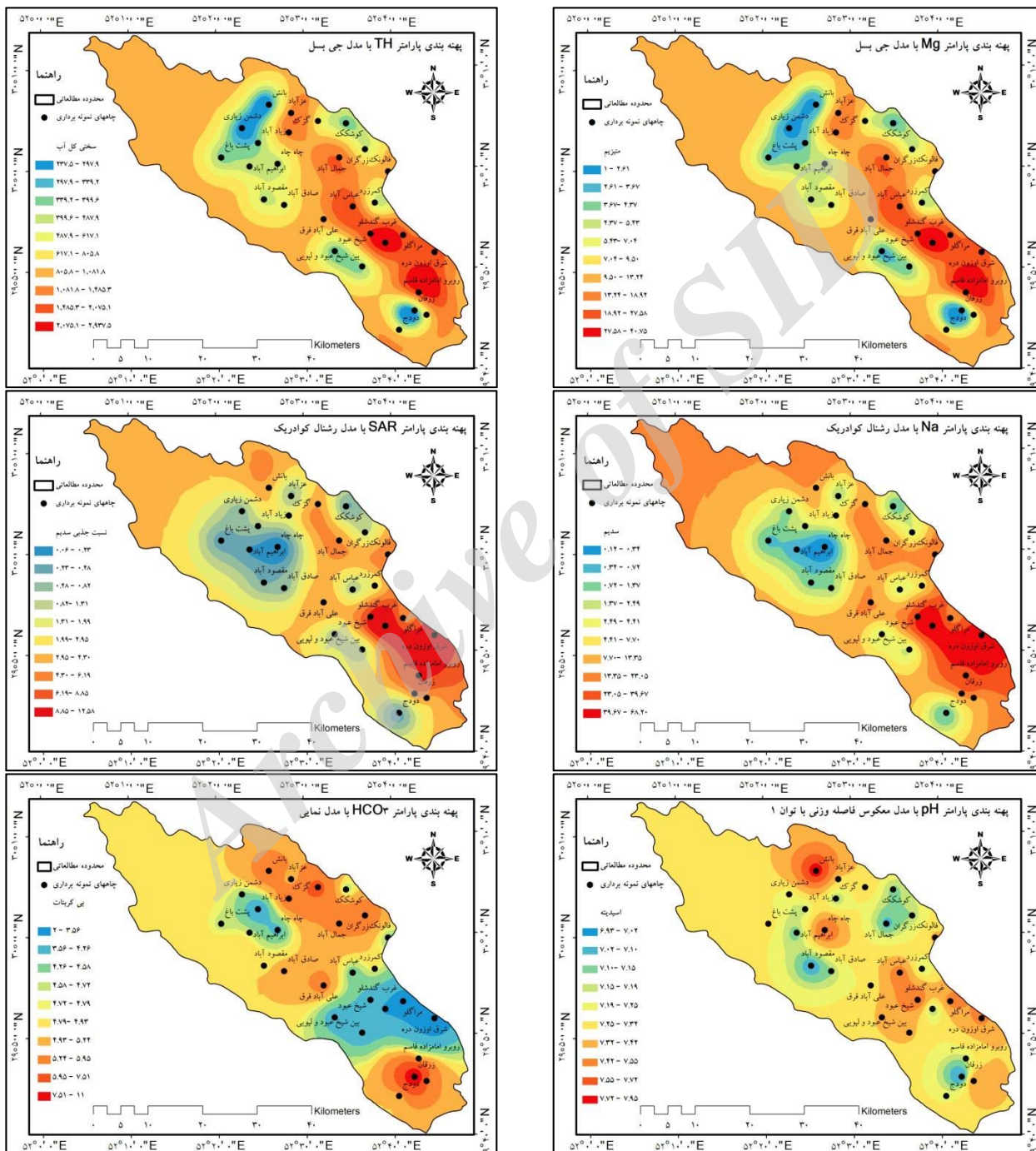
برای تعیین مناسب‌ترین روش میانمایی از میان روش‌های قطعی یعنی معکوس فاصله وزنی و تابع شعاع محور و روش‌های زمین آماری کریجینگ ساده و کوکریجینگ ساده، از ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSe) استفاده شد. نتایج نشان داد که برای پارامترهای TH و Mg مدل جی-بسل به ترتیب با مقدار خطای ۱۷۲/۳۴ و ۲/۶۷، برای عناصر شیمیایی

جدول ۷. نتایج ارزیابی روش‌های قطعی و زمین آماری با استفاده از معیار آماری RMSe

RMSe	بهترین روش میانمایی		شاخص کیفیت آب زیرزمینی
	مدل نیم تغییر نگار	روش تخمین	
۶۲۸/۷۶	بهینه با توان ۲/۲۸	معکوس فاصله وزنی	TH
۵۸۸/۸۶	اسپیلاین کاملاً منظم	تابع شعاع محور	
۶۰۷/۶۸	رشنال کوادریک	کریجینگ	
۱۷۲/۳۴	جی-بسل	کوکریجینگ	
۹/۴۶	بهینه با توان ۱/۸۷	معکوس فاصله وزنی	Mg
۸/۹۳	اسپیلاین چندریعی معکوس	تابع شعاع محور	
۸/۵۸	جی-بسل	کریجینگ	
۲/۶۷	جی-بسل	کوکریجینگ	
۳/۲۲	بهینه با توان ۱	معکوس فاصله وزنی	SAR
۳/۱۳	اسپیلاین چندریعی معکوس	تابع شعاع محور	
۳/۶۶	دایره‌ای	کریجینگ	
۱/۵۵	رشنال کوادریک	کوکریجینگ	
۱۳/۱۹	بهینه با توان ۲/۱۷	معکوس فاصله وزنی	Na
۱۳/۱۹	اسپیلاین چندریعی معکوس	تابع شعاع محور	
۱۴/۸۶	رشنال کوادریک	کریجینگ	
۴/۷۷	رشنال کوادریک	کوکریجینگ	
۰/۲۴	بهینه با توان ۱	معکوس فاصله وزنی	pH
۰/۲۶	اسپیلاین کاملاً منظم	تابع شعاع محور	
۰/۲۷	نمایی	کریجینگ	
۰/۲۷	نمایی	کوکریجینگ	
۱/۵۲	بهینه با توان ۱/۲	معکوس فاصله وزنی	HCO_3
۱/۴۷	اسپیلاین چندریعی معکوس	تابع شعاع محور	
۱/۴۲	نمایی	کریجینگ	
۱/۲۷	نمایی	کوکریجینگ	

معنی دار قوی با هم می‌باشند (۰/۹۲)، بنابراین توزیع مکانی تغییرات این دو پارامتر در محدوده مطالعاتی تا حدود زیادی مشابه هم است.

تأثیر پارامترهای کیفی بر روی منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه از روش کوکریجینگ با مدل جی-بسل برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی عناصر TH و Mg استفاده شد و این دو عنصر دارای همبستگی



شکل ۵. نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی دشت بیضاء- زرقان

مناسبی از لحاظ غلظت بی‌کربنات قرار دارند. مقدار این عنصر شیمیایی در شرق اوزون دره به کمترین میزان خود یعنی ۲ (میلی اکسی والان در لیتر) می‌رسد، اما نواحی شمال شرق و جنوب محدوده مطالعاتی از شرایط نامناسبی برخوردارند، بطوریکه غلظت بی‌کربنات در زرقان به مقدار ۱۱ (میلی اکسی والان در لیتر) می‌رسد. میزان پارامترهای سختی کل آب، منیزیم، نسبت جذبی سدیم و سدیم در نواحی جنوب شرقی به بیشترین و در شمال دشت به کمترین غلظت خود می‌رسد.

بحث و نتیجه‌گیری

رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق، کاربرد تکنیک تحلیل عاملی به منظور کاهش حجم داده‌ها و تعیین مهم‌ترین عناصر شیمیایی مؤثر در کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه و استفاده از روش‌های مختلف زمین‌آماري باهدف تشخیص بهترین مدل برای پهنه‌بندی مکانی متغیرهای کیفی بوده است. نتایج نشان داد که سه عامل قابلیت تبیین واریانس‌ها را دارند. یعنی عامل‌های سختی آب، شوری آب و اسیدیته آب به ترتیب هرکدام ۴۴/۴، ۳۴/۷ و ۱۰/۹ درصد واریانس را در بردارند و در مجموع ۹۰/۱ درصد تغییرات کیفی آب زیرزمینی منطقه تحت تأثیر این سه مؤلفه اصلی است. همچنین سهم هر متغیر شیمیایی یا بار عاملی در هر عامل بعد از چرخش واریماکس تعیین گردید. بنابراین از عامل اول، پارامترهای TH و Mg، از عامل دوم، متغیرهای SAR و Na و از عامل سوم، عناصر pH و HCO_3 که دارای بیشترین بار عاملی بر روی عامل‌های استخراج‌شده بودند، به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی منطقه انتخاب شدند. بنابراین تغییرات مکانی پارامترهای فوق با استفاده از روش‌های قطعی و زمین‌آماري میانبایی گردید. در روش‌های زمین‌آمار برای انتخاب مدل مناسب جهت برازش به نیم تغییرنمای تجربی از ریشه میانگین مربع خطای استاندارد (RMS) و استحکام ساختار فضایی قوی‌تر استفاده شد. برای تعیین مناسب‌ترین روش میانبایی از میان روش‌های قطعی یعنی معکوس فاصله وزنی و تابع شعاع محور و روش‌های زمین‌آماري کریجینگ

شرایط مشابه برای دو پارامتر کیفی SAR و Na نیز صادق است (ضریب همبستگی این دو عنصر ۰/۹۷ است). بیشترین مقدار پارامترهای شیمیایی TH و Mg در شرق و جنوب شرقی دشت و در مناطقی چون روبروی امامزاده قاسم، شرق اوزون دره، مراگلو، غرب و شرق گندشلو و عباس‌آباد مشاهده می‌شود. بطوریکه مقدار سختی کل آب در شرق گندشلو به ۲۹۳۷/۵ (میلی‌گرم در لیتر) و غلظت منیزیم در همین منطقه به ۴۰/۷۵ (میلی اکسی والان در لیتر) می‌رسد. کمترین میزان غلظت این دو عنصر شیمیایی در شمال منطقه یعنی بانس، دشمن زیاری و پشت باغ و ناحیه کوچکی در جنوب دشت (زرقان) دیده می‌شود. مقدار سختی کل آب و منیزیم به ترتیب در بانس ۲۳۷/۵ (میلی‌گرم در لیتر) و در دشمن زیاری ۱ (میلی اکسی والان در لیتر) است. نقشه‌های مربوط به تغییرات مکانی دو عنصر SAR و Na ترسیم‌شده با مدل رشنال کوادریک بیانگر آن است که مقدار این دو پارامتر در جنوب شرقی دشت به بیشترین و در شمال منطقه به کمترین حد خود می‌رسد. مناطقی چون چاه چاه، ابراهیم‌آباد، پشت باغ و مقصودآباد از شرایط نسبتاً خوبی برخوردارند و مقدار نسبت جذبی سدیم و عنصر سدیم به ترتیب با میزان ۰/۰۶ و ۰/۱۲ (میلی اکسی والان در لیتر) در محدوده چاه چاه به کمترین غلظت خود می‌رسد. اما نقاطی مانند روبروی امامزاده قاسم، شرق اوزون دره، غرب و شرق گندشلو و مراگلو در بدترین شرایط به سر می‌برند، بطوریکه مقدار این دو پارامتر به ترتیب ۱۲/۵۸ و ۶۸/۲ (میلی اکسی والان در لیتر) در شرق گندشلو مشاهده می‌شود. توزیع مکانی تغییرات پارامتر کیفی pH که با مدل نمایی تهیه شد، نشان می‌دهد که غلظت آن در منطقه بانس بسیار بالا بوده و مقدار آن ۷/۹۵ (میلی اکسی والان در لیتر) است. مناطقی چون چاه چاه، شرق و غرب گندشلو، شرق اوزون دره، مراگلو و عباس‌آباد نیز از لحاظ اسیدیته آب در شرایط مناسبی نیستند، اما نقاطی مانند مقصودآباد، جمال‌آباد، کوشکک و زرقان در شرایط بهتری از لحاظ pH قرار دارند. نقشه پهنه‌بندی عنصر HCO_3 ترسیم‌شده با مدل نمایی بیانگر آن است که ناحیه کوچکی در شمال و منطقه وسیع‌تری در شرق دشت در شرایط

حیدری و ف. سرمدیان. ۱۳۸۷. بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۲(۵): ۶۳-۷۰.

۳. جهان‌شاهی، ا. ع. روحی مقدم و ع. دهواری. ۱۳۹۳. ارزیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین‌آمار (مطالعه موردی: آبخوان دشت شهر بابک). دانش آب و خاک، ۲۴(۲): ۱۸۳-۱۹۷.

۴. حیدری‌زادی، ز. و ث. یعقوبی. ۱۳۹۶. بررسی روند تغییرات کمی و کیفی آبخوان دشت ابوغویر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. ترویج و توسعه آبخیزداری، ۵(۱۶): ۹-۱۶.

۵. خسروی، ح.، ا. مرادی و ح. دارابی. ۱۳۹۴. شناسایی مناطق همگن از نظر کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل عاملی و خوشه‌ای؛ مطالعه موردی دشت قیر استان فارس. مهندسی آبیاری و آب، ۶(۲۱): ۱۱۹-۱۳۳.

۶. رستم‌زاده، ه.، م. ر. نیکجو، ا. اسدی و ج. جعفرزاده. ۱۳۹۴. توان سنجی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی قابل شرب در پهنه‌های جمعیتی دشت اردبیل با استفاده از ترکیب مدل‌های زمین‌آمار و تصمیم‌گیری چندمعیاری در محیط GIS. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۳): ۴۳-۶۰.

۷. رضایی، م. و. امیری. ۱۳۹۲. ارزیابی تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت لنجان با استفاده از تحلیل عاملی ترکیب شده با نظریه انتروپی اطلاعات. محیط‌شناسی، ۳۹(۲): ۳۳-۴۴.

۸. زاهدی‌فر، م.، س. ع. ا. موسوی و م. رجبی. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی ویژگی‌های شیمیایی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت فسا با استفاده از روش‌های زمین‌آمار. آب و خاک، ۲۷(۴): ۸۱۲-۸۲۲.

۹. شعبانی، م. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تهیه نقشه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی آن‌ها مطالعه موردی: دشت نی‌ریز، استان فارس. جغرافیای طبیعی، ۴(۱۳): ۸۳-۹۶.

۱۰. عباسی‌جندانی، ش. و ع. طالبی. ۱۳۹۴. مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی در مناطق خشک با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت کوهپایه - سگری اصفهان). طلوع بهداشت یزد، ۱۴(۱): ۱۲۳-۱۳۷.

ساده و کوکریجینگ ساده، از فن اعتبارسنجی متقابل با معیار آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSe) استفاده شد. نتایج نشان داد که برای متغیرهای TH و Mg مدل جی-بسل، برای عناصر SAR و Na، مدل رشنال کوادریک، برای پارامتر HCO_3 مدل نمایی و برای pH مدل معکوس فاصله وزنی با توان بهینه (توان ۱) دارای مقدار RMSe کمتری بوده و دقت پیش‌بینی را تا حد بسیار زیادی بالا برده است.

نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی دشت بیانگر آن است که میزان پارامترهای TH، Mg، SAR و Na در نواحی جنوب شرقی به بیشترین و در شمال دشت به کمترین غلظت خود می‌رسد. توزیع مکانی تغییرات عنصر شیمیایی pH نشان داد که مقدار آن در منطقه بانس واقع در شمال دشت بسیار بالا بوده و از لحاظ غلظت HCO_3 ، نواحی شمال شرق و جنوب منطقه در شرایط نامناسبی قرار دارند. استفاده از روش‌های زمین‌آمار جهت پهنه‌بندی و تحلیل مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی با مطالعات و تحقیقات تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲) در دشت رفسنجان، مزارعی بهبهانی و همکاران (۱۶) در آبخوان دشت بهبهان، عباسی‌جندانی و طالبی (۱۰) در دشت کوهپایه سگری استان اصفهان و ولی‌زاده کامران و همکاران (۱۹) در دشت شیرامین استان آذربایجان شرقی مطابقت دارد. بنابراین تکنیک تحلیل عاملی و روش‌های زمین‌آمار می‌تواند ابزار سودمندی برای تحلیل و بررسی تغییرات مکانی پارامترهای شیمیایی منابع آب زیرزمینی باشد و در صورت وجود اطلاعات و داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی، ما را در بررسی بلندمدت و دقیق کیفیت و آلودگی منابع آب زیرزمینی یاری کند.

منابع مورد استفاده

۱. پیری، ح. و ا. بامری. ۱۳۹۳. بررسی روند تغییرات کمی سطح ایستابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت سیرجان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۵(۱): ۲۹-۴۴.

۲. تقی‌زاده مهرجردی، ر.، م. زارعیان جهرمی، ش. محمودی، ا.

- a case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural Water Management*, 97(2): 240-246.
23. Brus DJ, Heuvelink GB. 2007. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1): 86-95.
 24. Davis A, Kempton JH, Nicholson A, Yare B. 1994. Groundwater transport of arsenic and chromium at a historical tannery, Woburn, Massachusetts, USA. *Applied Geochemistry*, 9(5): 569-582.
 25. Dorgham MM, Abdel-Aziz N, El-Deeb K, Okbah M. 2004. Eutrophication problems in the western harbour of Alexandria, Egypt. *Oceanologia*, 46(1): 25-44.
 26. Jang CS, Chen SK, Kuo YM. 2013. Applying indicator-based geostatistical approaches to determine potential zones of groundwater recharge based on borehole data. *Catena*, 101: 178-187.
 27. Johnston K, Ver Hoef JM, Krivoruchko K, Lucas N. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. Esri Redlands, CA, New York, USA, 306 pp.
 28. Kresic N. 2006. *Hydrogeology and Groundwater Modeling*. 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 828 pp.
 29. Love D, Hallbauer D, Amos A, Hranova R. 2004. Factor analysis as a tool in groundwater quality management: two southern African case studies. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(15): 1135-1143.
 30. Shi J, Wang H, Xu J, Wu J, Liu X, Zhu H, Yu C. 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, 52(1): 1-10.
 31. Sun Y, Kang S, Li F, Zhang L. 2009. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling & Software*, 24(10): 1163-1170.
 32. Zhou Z, Zhang G, Yan M, Wang J. 2012. Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(6): 3697-3710.
 ۱۱. عساکره، ح. ۱۳۹۰. مبانی اقلیم‌شناسی آماری. انتشارات دانشگاه زنجان. ۵۵۰ صفحه.
 ۱۲. علیزاده، ا. ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۹۴۲ صفحه.
 ۱۳. غفوری، و، ن. ملک‌پور و ا. مردانی. ۱۳۹۰. ارزیابی زمین‌آماری کیفیت آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۱(۲): ۸۱-۹۴.
 ۱۴. غیور، ح. و م. منتظری. ۱۳۸۳. پهنه‌بندی رژیم‌های دمایی ایران با مؤلفه‌های مبنا و تحلیل خوشه‌ای. *جغرافیا و توسعه*، ۴: ۲۱-۳۴.
 ۱۵. کردوانی، پ. ۱۳۸۶. ژئوهیدرولوژی. مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. ۳۶۸ صفحه.
 ۱۶. مزارعی بهبهانی، س. س. ز. حسینی و س. ع. المدرسی. ۱۳۹۳. مقایسه دقت روش‌های مختلف زمین‌آمار در ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی برای استفاده‌های کشاورزی (مطالعه موردی: آبخوان دشت بهبهان). *مدیریت آب در مناطق خشک*، ۱(۲): ۶۵-۷۵.
 ۱۷. مظفری، غ. و ح. بهزادی کریمی. ۱۳۹۶. برآورد سطح ایستایی منابع آب زیرزمینی دشت بیضاء استان فارس. *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۶(۲۱): ۱۴۵-۱۶۳.
 ۱۸. مهدوی، م. و م. طاهرخانی. ۱۳۹۱. کاربرد آمار در جغرافیا. *نشر قومس*. ۴۳۴ صفحه.
 ۱۹. ولی‌زاده کامران، خ. ش. روستایی، ت. رحیم‌پور و م. نخستین روحی. ۱۳۹۵. تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه‌ی تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی (مطالعه‌ی موردی: دشت ششیرامین، استان آذربایجان شرقی). *هیدروژئومورفولوژی*، ۲(۶): ۱۷-۳۲.
 20. Ahmadi M, Bagheban Zade Dezfouli A. 2012. A geo-statistical approach to the change procedure study of under-ground water table in a GIS framework, case study: Razan-Ghahavand Plain, Hamedan Province, Iran. *Journal of Academic and Applied Studies*, 2(11): 56-69.
 21. Al-Kouri O, Omar H, Abu-Shariah M, Mahmud AR, Mansor S. 2010. Geostatistical analysis of karst landscapes. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15: 913-934.
 22. Baalousha H. 2010. Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics:



Spatial analysis of chemical parameters affecting groundwater quality using factor analysis and geostatistical methods (Case study: Bayza-Zarghan plain)

H. Behzadi Karimi^{1*}, K. Omidvar²

1. Ph.D. Student of Climatology, Yazd University

2. Prof. College of Geography, Yazd University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 09 September 2016

Accepted 27 May 2017

Available online 20 February 2018

Keywords:

Groundwater quality parameters

Factor analysis (FA)

Geostatistical methods

Bayza-Zarghan plain

Fars province

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the most important variables affecting the quality of groundwater in the Bayza-Zarghan plain by using factor analysis technique and estimation of spatial distribution of quality parameters in ArcGIS software. Data of 12 water quality parameters related to 27 wells were collected in summer, 2013. After normalizing the data, using factor analysis (FA), of hardness, salinity and water acidity, that accounted for 90% of the total variance in the data. The share of variables in each factor was determined after Varimax rotation, and two parameters with the most significant correlation with its factor was determined for each factor. The first factor, TH and Mg, the second factor, SAR and Na, and the third factor, pH and HCO₃ were selected as the most important parameters in groundwater quality in the region. The results of definitive and geostatistical methods for estimating the above parameters were analyzed using the statistical criterion of RMSe. The results showed that for all variables other than pH, COKriging method is the most appropriate method. For TH and Mg, the G-Bessel model, for SAR and Na, the Rational-Quadratic model, for HCO₃, the Exponential model, and for pH, the IDW model with power 1, had a lower error and increased the accuracy of the prediction significantly. Spatial zoning maps for the quality parameters indicated that TH, Mg, SAR and Na parameters reach the highest density in the southeast and the lowest density in the north of the plain. The pH changes show that its value is higher in the Banish area in north of the plain than in other areas. And in terms of HCO₃, the northeastern and southern regions of the region are in poor condition.

* Corresponding author e-mail address: h.bkarimi@chmail.ir