

پهنه‌بندی کیفیت منابع آب برای کاربری کشاورزی و شرب با استفاده از شاخص کیفیت آب و تکنیک‌های زمین‌آمار در حوضه آبخیز سمنان

مجتبی قندالی^۱، کامران شایسته^{۱*} و محمد سعدی مسگری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۹)

چکیده

تعیین کیفیت آب در مدیریت منابع آب از اهمیت خاصی برخوردار بوده و پایش و پهنه‌بندی آن به‌عنوان یک اصل مهم در برنامه‌ریزی‌ها باید مد نظر قرار گیرد. در این تحقیق به‌منظور بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی (شامل چشمه، چاه و قنات) در حوضه آبخیز سمنان، ابتدا شاخص کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی با استفاده از پارامترهای سولفات، کلر و سدیم، منیزیم، اسیدیته، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، کل جامدات محلول مورد اندازه‌گیری در ۵۵ منبع آب زیرزمینی به‌دست آمد. وزن پارامترها در محاسبه شاخص کیفیت آب از روش تحلیل سلسله مراتب فازی با تحلیل توسعه‌ای چانگ به‌دست آمد. در این پژوهش با توجه به کمبود تعداد منابع مورد سنجش کیفیت آب برای پهنه‌بندی کل منطقه و وجود اطلاعات هدایت الکتریکی از بیشتر منابع آب زیرزمینی مورد استفاده در این حوضه (۳۵۴ منبع) و همچنین همبستگی بالا میان شاخص‌های کیفیت آب با هدایت الکتریکی (ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۹۸)، شاخص‌های مذکور با استفاده از رابطه رگرسیون بر اساس هدایت الکتریکی برای سایر منابع آب به‌دست آمد. برای تحلیل توزیع مکانی و پهنه‌بندی کیفیت آب از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 و روش درون‌یابی زمین‌آمار کریجینگ ساده و معمولی و روش‌های معین مانند وزن‌دهی عکس فاصله، تابع پایه شعاعی استفاده شد. ارزیابی نتایج درون‌یابی مکانی بر اساس معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، %RMSE و ضریب تعیین (R^2) نشان داد که روش کریجینگ معمولی و تابع پایه شعاعی مناسب‌ترین برآورد را برای منطقه مورد مطالعه دارند.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت آب، درون‌یابی، زمین‌آمار، کریجینگ، تحلیل سلسله مراتب فازی

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر

۲. گروه سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین توسی، تهران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ka_shayesteh@yahoo.com

مقدمه

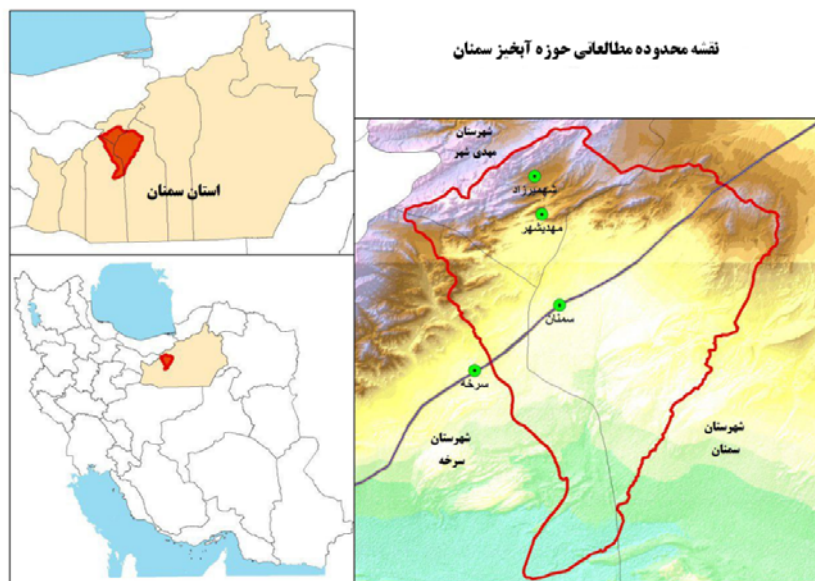
کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند آب سطحی در حال تغییر است، اما این تغییرات نسبت به آب‌های سطحی بسیار کندتر صورت می‌گیرد (۶). با توجه به قرار گرفتن بخش وسیعی از کشور در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، آب‌های زیرزمینی منبع مهمی برای تأمین آب مصرفی در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعتی و شرب مردم این مناطق محسوب می‌شوند (۳ و ۴۲). این در حالی است که وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی‌مدت، افزایش تصاعدی جمعیت و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی، باعث کمبود شدید آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است (۴۱). علاوه بر افت کمی، امروزه افت کیفیت آب‌های زیرزمینی و شور شدن آن خطر جدی در برابر توسعه به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۳۰). روش‌های گوناگونی برای مطالعه و پهنه‌بندی تغییرات کیفیت آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آنها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و داده‌های کافی دارای دقت‌های گوناگونی است (۱۰). بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی در شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلوده‌کننده و تعیین مناسب‌ترین راهکارهای مدیریتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ در همین راستا روش‌های زمین‌آمار و GIS می‌توانند ابزار مفیدی باشند (۳۱).

شاخص کیفیت آب زیرزمینی، ارائه دهنده روشی برای مختصرسازی شرایط کلی کیفیت آب است و به درک این مسئله که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی خطری بالقوه برای استفاده‌های مختلف آب است یا خیر، منجر می‌شود. درنهایت این روش به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و نشان دادن موفقیت در حفظ و بهبود آن کمک می‌کند. در واقع، شاخص کیفیت آب، پارامترهای مختلف کیفی آب را برای ارائه مقدار شاخص نهایی با هم ترکیب می‌کند که می‌تواند برای مقایسه‌های مکانی استفاده شود (۱۹).

سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار، قابلیت قابل ملاحظه‌ای برای تخمین نقاط نامشخص دارند و می‌تواند کمک

مؤثری در تصمیم‌گیری مدیران در خصوص مدیریت سرزمین و کاربری اراضی باشد. در این زمینه مطالعات مختلفی صورت گرفته از جمله فتونی و همکاران (۱۴)، در مطالعه‌ای به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت‌های کشاورزی مراکش پرداختند و با استفاده از روش کریجینگ معمولی نسبت به پهنه‌بندی کیفی آب‌های زیرزمینی اقدام کردند. ادھیکاری و همکاران (۲)، کیفیت آب برای کاربری کشاورزی و شرب را در منطقه دهلی هند مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش روش کریجینگ به‌عنوان روش مناسب برای درون‌یابی داده‌ها در تهیه نقشه‌های پارامترهای کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند نسبت جذب سدیم، هدایت الکتریکی، نسبت بی‌کربنات، نسبت کلسیم، نترات و سختی کل معرفی شد. صالحی و زینی‌وند (۳۶)، به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای شرب و کشاورزی در منطقه غرب شهرستان میوان پرداختند که با استفاده از شاخص‌های ریشه دوم مربعات خطا، میانگین خطای مطلق و ضریب تعیین به بررسی دقت روش‌های درون‌یابی از جمله تابع پایه شعاعی، کریجینگ ساده تخمینگر موضعی پرداختند. ولیزاده و همکاران (۳۹)، به تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی در دشت شیرامین پرداختند. در این پژوهش، روش کریجینگ ساده با توجه به داشتن ریشه دوم مربعات خطا کمتر و ضریب همبستگی بیشتر بین مقادیر تخمینی و مشاهده شده به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. مرآتی و همکاران (۲۷) به پهنه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار در حوضه آبخیز سلیمان‌شاه پرداختند. در این مطالعه روش کریجینگ معمولی بر سایر روش‌ها از نظر دقت تخمین ارجحیت داشته است.

در این تحقیق با توجه به کمبود تعداد منابع مورد سنجش برای پارامترهای کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه، پراکنش نامناسب آن و همچنین هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری بسیاری از پارامترها، از رابطه رگرسیون برای برآورد شاخص کیفیت آب شرب و کشاورزی براساس پارامتر هدایت الکتریکی استفاده



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه - حوضه آبخیز سمنان

روش تحقیق

ارزیابی کیفیت منابع آب

یکی از عوامل مهم در پایداری توسعه منطقه، فراهم کردن منابع آب مناسب برای مصارف مختلف است که وضع کیفی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مدیریت یکپارچه منابع آب، حفظ کیفیت آب به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت نسبی آب مواجه هستند، به‌عنوان یکی از ارکان برنامه‌ریزی مطرح است (۱۰). تا کنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی ابداع شده‌اند و مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از میان آنها شاخص کیفیت آب (WQI) یک روش شناخته شده و یکی از ابزارهای کارآمد برای بیان کیفیت آب است (۹). این شاخص با استفاده از یک رابطه ریاضی، تعداد زیادی از متغیرهای کیفی آب را به یک عدد تبدیل می‌کند که این شاخص عددی سطح کیفیت آب را نشان می‌دهد (۱۶). همچنین این شاخص یک تکنیک بسیار مهم برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف انسانی است (۳۳). شاخص کیفیت آب اولین بار توسط هورتن در سال ۱۹۶۵ معرفی شد. با استفاده از این شاخص می‌توان داده‌ها و اطلاعات تخصصی کارشناسان را به

شد. سپس از روش‌های درون‌یابی از جمله وزن‌دهی فاصله معکوس، تابع پایه شعاعی، کریجینگ در سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌منظور پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سمنان به مساحت ۲۵۷/۶۱۳ هکتار، در محدوده جغرافیایی ۰۸' - ۳۵° تا ۵۰' - ۳۵° عرض شمالی و ۰۵' - ۵۳° تا ۴۸' - ۵۳° طول شرقی قرار گرفته است، این حوضه، عرصه‌ای است که در برگیرنده شهرستان‌های سمنان و مهدیشهر و بخشی از شهرستان سرخه است (شکل ۱). این حوضه به‌دلیل قرار گرفتن در نیمه جنوبی رشته کوه‌های البرز، دارای تنوع توپوگرافیکی است به‌طوری که حداکثر ارتفاع محدوده ۳۲۸۲ متر از سطح دریا در شمال و حداقل ارتفاع ۸۱۹ متر در جنوب حوضه واقع شده است. این تنوع توپوگرافیکی به همراه عوامل اقلیمی منجر به تنوع اکوسیستمی در آن منطقه شده است به‌طوری که این حوضه در برگیرنده اکوسیستم‌های، کوهستانی، بیابانی و کویری است.

جدول ۱. طبقه بندی شاخص کیفیت آب

WQI	کمتر از ۵۰	۵۰ - ۱۰۰	۱۰۰ - ۲۰۰	۲۰۰ - ۳۰۰	بیشتر از ۳۰۰
کیفیت آب	عالی	خوب	ضعیف	بسیار ضعیف	نامناسب

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای کاربرد شرب

پارامتر	pH	TDS	Cl	SO ₄	Mg	Na	Ca
واحد سنجش	اسیدیته	mg/lit	mg/lit	mg/lit	mg/lit	mg/lit	mg/lit
وزن	۰/۲۳۷	۰/۱۸۶	۰/۱۷۹	۰/۱۳۴	۰/۱۱۴	۰/۰۸۹	۰/۰۶۱
حداکثر مطلوب	۶/۵-۸/۵	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۳۰	۲۰۰	۳۰۰

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای کاربرد کشاورزی

پارامتر	واحد سنجش	حد مطلوب	حداکثر قابل قبول	ضریب اهمیت
کلور	mg/lit	۱۰۰	۳۰۰	۰/۲۱
نسبت جذب سدیم	نسبت	۴۰	۶۰	۰/۳۹
هدایت الکتریکی	umhos/cm	۷۰۰	۳۰۰۰	۰/۴۰

آب زیرزمینی (شامل چشمه، چاه و قنات) جمع‌آوری شده توسط دفتر مطالعات منابع پایه آب وابسته به شرکت آب منطقه‌ای سمنان استفاده شد.

ارزیابی کیفیت آب برای شرب: پارامترهای مورد نیاز برای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای کاربرد شرب با استفاده از مرور منابع (۲، ۵، ۱۳، ۱۴ و ۴۱)، تعیین شد (جدول ۲). شایان ذکر است که حداکثر مطلوب پارامترهای ذیل از کتابچه استاندارد آب شرب تهیه شده توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران استخراج شده است (۲۱). ضریب اهمیت پارامترهای مذکور در تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی به‌منظور کاربری شرب و کشاورزی توسط مرور منابع مختلف و نظرات کارشناسان مربوطه و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتب فازی به‌دست آمده است.

ارزیابی کیفیت آب برای کاربری کشاورزی: پس از مرور منابع مختلف (۲۲، ۲۳، ۲۴، ۳۴ و ۳۶) در خصوص پارامترهای تأثیر گذار بر کیفیت آب برای کاربری کشاورزی، پارامترهای مهم برای ارزیابی کیفیت آب برای مصرف کشاورزی تعیین شد (جدول ۳).

وزندهی پارامترها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی:

اعداد ساده‌تر، کلی‌تر و قابل استفاده در تصمیم‌گیری‌های مدیران تبدیل کرد (۱). محاسبه شاخص WQI شامل مراحل زیر است:

۱- محاسبه زیر شاخص آلودگی (qi) برای هر متغیر کیفیت آب با تقسیم میزان آن متغیر بر استاندارد تعیین شده توسط سازمان‌های ذیصلاح

$$qi = (Ci/Si) * 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق qi: زیر شاخص آلودگی برای هر متغیر کیفیت آب، Ci: میزان متغیر در هر نمونه Si: استاندارد سازمان‌های ذیصلاح

۲- تعیین فاکتور وزن Wi برای هر یک از متغیرهای کیفیت آب بر اساس اهمیت نسبی آن متغیر بر کیفیت کلی آب

۳- ضرب هر زیر شاخص آلودگی در فاکتور وزنی مربوط به آن و محاسبه SI

$$SI = Wi * qi \quad (2)$$

۴- محاسبه جمع وزنی زیرشاخص‌ها و ایجاد شاخص نهایی WQI

$$WQI = \sum Si \quad (3)$$

مقادیر به‌دست آمده از شاخص WQI، در پنج طبقه کیفی شامل عالی، خوب، ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب، مطابق جدول (۱) طبقه‌بندی می‌شود. در این پژوهش از داده‌های کیفیت منابع

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i \quad (4)$$

$F(x, y)$: مقدار تخمین زده شده شاخص در نقطه‌ای با مختصات x و y تعداد نقاط اندازه‌گیری شده؛ w_i وزن نسبت داده شده به نقطه i ؛ f_i مقادیر شاخص در نقطه اندازه‌گیری شده i است؛ مقدار وزن از طریق مدل واریوگرام تأمین می‌شود.

روش کوکریجینگ: یک حالت چند متغیره از کریجینگ است که بر اساس همبستگی موجود بین متغیر اصلی و سایر متغیرهای اندازه‌گیری شده که در اصطلاح متغیر کمکی یا ثانویه نامیده می‌شوند به تخمین متغیر مورد نظر می‌پردازد. این ویژگی می‌تواند باعث دقت بیشتر تخمین و صرفه‌جویی در هزینه‌ها مثلاً از طریق کاهش نمونه‌برداری یا اندازه‌گیری متغیر اصلی شود. تخمین‌گر کوکریجینگ هرگاه یک متغیر کمکی علاوه بر متغیر اصلی موجود باشد، مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود (۱).

$$Z_v^*(u_0) = \pi r^2 \sum_{i=1}^n [\alpha_i \cdot Z_v(u_i) + \beta_i \cdot Z_w(u_i)] \quad (5)$$

$Z_v^*(u_0)$: مقدار تخمین زده شده متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_0 ، α_i وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ای متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_i ، 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.

وزندگی معکوس فاصله (IDW): در این روش نیازی به تعیین الگوی تغییرات مکانی یعنی تغییرنا نیست. معکوس فاصله یک روش وزندگی متوسط است که در آن داده‌ها از طریق رابطه انحراف معیار یک نقطه از سایر نقاط با استفاده از گره‌های شبکه بندی شده، وزندگی می‌شوند. در این روش وزن‌ها تنها با توجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به نحوه پراکندگی نقاط حول نقطه مورد تخمین، تعیین می‌شوند. به نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و به نقاط دورتر وزن کمتری داده می‌شود (۱۲). این روش به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_i = \frac{D^{-\pi}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\pi}} \quad (6)$$

استفاده از تئوری فازی در مقایسات زوجی و وزندگی معیارها، این امکان را به فرد تصمیم‌گیرنده می‌دهد که علیرغم اطلاعات ناقص، اطلاعاتی که به صورت کیفی بیان می‌شوند و همچنین معیارهایی که قابل سنجش با یکدیگر نیستند، بتوان تصمیم‌گیری کرد. روش‌های بسیار زیادی از تحلیل فازی سلسله مراتبی داده‌ها وجود دارد که توسط نویسندگان مختلفی ارائه شده است (۷ و ۲۶). یونگ چانگ در سال ۱۹۹۶ مدلی را ارائه کرد (۸) که این مدل آمیزه‌ای از روش تحلیل سلسله مراتبی و تئوری فازی بوده و تحت عنوان روش تحلیل سلسله مراتبی فازی نامیده شد. از آن جایی که این روش سازگاری زیادی با نحوه تفکر و فرایندهای ذهنی انسان دارد و نیز الگوریتم آن بر اساس یک منطق ریاضی بنا شده است، از کارایی بالا برخوردار است و امروزه به عنوان یک روش نوین در تصمیم‌گیری مطرح است (۴۰). در این پژوهش برای وزندگی به فاکتورها از روش تحلیل سلسله مراتب فازی بر اساس تحلیل توسعه فازی چانگ (۸) در نرم‌افزار Matlab 2014a استفاده شده است. ضریب ناسازگاری مقایسات با استفاده از روش گوگوس و بوچر (۱۸) محاسبه شد که ضریب ناسازگاری همگی مقایسات کمتر از ۰/۱ است.

پهنه‌بندی کیفیت منابع آب: تاکنون در پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی از روشهای مختلف درون‌یابی استفاده شده است. به نظر می‌رسد روش مناسب درون‌یابی مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی وابسته به مکان باشد و بایستی برای هر آبخوان جداگانه صورت گیرد (۱۴). تفاوت عمده این روش‌ها مربوط به نحوه محاسبه وزنی است که به نقاط مشاهده شده اطراف نقطه مجهول داده می‌شود.

روش‌های میان‌یابی کریجینگ، روش کوکریجینگ: روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ بر اساس تعریف واریوگرام استوار بوده و موفقیت روش به انتخاب مدل مناسب یا بهینه واریوگرام بستگی دارد (۲۵) از واریوگرام، برای محاسبه وزن در روش کریجینگ استفاده می‌شود. معادله اساسی کریجینگ به شکل رابطه (۴) است:

جدول ۴. ارزیابی صحت روش‌های درون‌یابی شاخص کیفیت آب (برای ۵۵ نمونه در سطح منطقه)

شاخص کیفیت	روش درون‌یابی	نمونه ۵۵	R ^۲	MAE	RMSE	% RMSE
کشاورزی	کریجینگ	ساده	۰/۴۸	۲۵/۲۹	۳۳/۶۵	۴۹/۶
کشاورزی	کو کریجینگ	معمولی	۰/۵۰	۲۴/۸۳	۳۳/۰۸	۴۸
کشاورزی	IDW	--	۰/۵۱	۲۴/۴۳	۳۲/۷۱	۴۸/۳
کشاورزی	RBF	توان ۱	۰/۴۴	۲۶/۱۷	۳۴/۸۴	۵۱
کشاورزی	RBF	C- R- S	۰/۴۱	۲۶/۸۱	۳۵/۷۲	۵۳
شرب	کریجینگ	ساده	۰/۳۹	۲۱/۸۹	۲۷/۰۷	۴۱
شرب	کو کریجینگ	معمولی	۰/۴۱	۲۱/۰۲	۲۶/۴۸	۴۰
شرب	کو کریجینگ	---	۰/۳۸	۲۱/۸۵	۲۷/۰۱	۴۰
شرب	IDW	توان ۱	۰/۳۶	۲۱/۵۴	۲۷/۴۶	۴۱/۱
شرب	RBF	C- R- S	۰/۳۵	۲۱/۸۴	۲۷/۷۸	۴۱/۶

خطا، R^2 ضریب تعیین، $Z^*(x_i)$: مقادیر برآورد شده هر مؤلفه کیفی آب، $Z(x_i)$: مقادیر اندازه‌گیری شده هر مؤلفه کیفی آب و n : تعداد نمونه‌ها، است. معیار RMSE نسبت به داده‌های پرت حساس است. به همین دلیل می‌توان از %RMSE استفاده کرد. کوچک‌تر بودن این معیار، دلیلی بر دقت بالاتر تخمین‌ها و یا اختلاف کم بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده است. حد قابل قبول %RMSE مقدار ۴۰ است و %RMSE بالاتر از ۷۱ درصد به معنی عدم دقت، در نظر گرفته شده است (۲۰). شاخص ضریب تعیین (ضریب همبستگی به توان ۲)، بین صفر تا یک متغیر است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کارایی بالاتر آن روش است. نرمال بودن توزیع داده‌ها که از شرایط استفاده از واریوگرام است با استفاده از آزمون کلموگراف اسمیرنوف بررسی شد.

نتایج

روش‌های درون‌یابی از جمله روش کریجینگ و کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس و توابع شعاعی برای ۵۵ منبع اولیه با استفاده از شاخص R^2 ، MAE، RMSE، و %RMSE مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴). سپس نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت منابع آب با استفاده از بهترین روش‌های مورد بررسی در محیط ArcGIS10.3 ترسیم شد (شکل ۲). لازم به ذکر است که در مقایسه کارایی و دقت روش‌های مورد استفاده، هر چه شاخص ضریب تعیین نزدیک به یک باشد و شاخص‌های میانگین مطلق

که در آن D_i فاصله i امین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین؛ π توان وزن‌دهی فاصله و n تعداد نقاط مجاور است. تابع پایه شعاعی (RBF): تابع پایه شعاعی از روش‌های درون‌یابی دقیق است و تابعی به صورت $\Phi_j(X) = \Phi(\|X - X_j\|)$ است که وابسته به فاصله نقطه مورد نظر ($X \in R^d$) تا نقطه ثابت ($X_j \in R^d$) است. Φ تابعی پیوسته و وابسته به هر زیر مجموعه $\Omega \in R^d$ است. R نشان‌دهنده فاصله اقلیدوسی بین هر جفت نقطه در مجموعه Ω است. این روش دارای پنج تابع کرنل Inverse Multiquadric، Completely Regularized Spline، Multiquadric، Thin Plate Spline، Spline With Tension است (۲۵). در این تحقیق تابع کرنل Inverse Multiquadric و Completely Regularized Spline با کمترین مقدار RMSE، انتخاب شد.

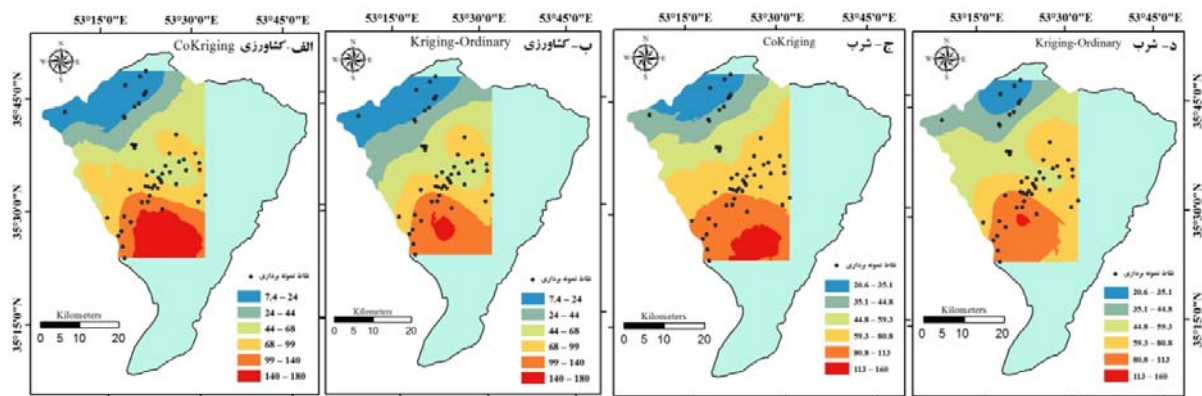
روش‌های ارزیابی دقت: برای مقایسه دقت روش‌های درون‌یابی از شاخص R^2 ، MAE و MBE و RMSE و %RMSE استفاده شد

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\%RMSE = \frac{(RMSE)}{\bar{X}} \times 100 \quad (9)$$

MAE میانگین مطلق خطا (دقت)، RMSE ریشه دوم میانگین مربع



شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی کیفیت منابع آب: الف) پهنه‌بندی کیفیت آب کشاورزی با روش CoKriging، ب) پهنه‌بندی کیفیت آب کشاورزی با روش Kriging-Ordinary، ج) پهنه‌بندی کیفیت آب شرب با روش CoKriging، د) پهنه‌بندی کیفیت آب شرب با روش Kriging-Ordinary

جدول ۵. بررسی ضریب همبستگی پیرسون میان شاخص کیفیت آب و پارامترهای مورد سنجش در ۵۵ منبع آب زیرزمینی

متغیرها	EC	PH	TDS	Na	CL	Ca	Mg	So4	
WQI	۰/۹۹۴**	-۰/۱۴۸	۰/۹۹۲**	۰/۷۹۶**	۰/۲۵۰	-۰/۰۴۲	۰/۳۶۲**	-۰/۰۱۵	r
کشاورزی	۰/۰۰۰	۰/۲۹۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۷۴	۰/۷۶۶	۰/۰۰۸	۰/۹۱۶	P-value
WQI شرب	۰/۹۹۰**	-۰/۱۸۱	۰/۹۸۷**	۰/۸۰۷**	۰/۳۴۲*	۰/۰۶۶	۰/۴۷۳**	۰/۰۶۲	r
	۰/۰۰۰	۰/۱۹۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۳	۰/۶۴۱	۰/۰۰۰	۰/۶۶۲	P-value

** و * به ترتیب همبستگی در سطح یک درصد و پنج درصد معنادار است.

محلول (ضریب همبستگی ۰/۹۹۲ و ۰/۹۸۷ با درجه معناداری یک درصد) است (جدول ۵). لذا با توجه به کم هزینه بودن سنجش پارامتر هدایت الکتریکی و همچنین در دسترس بودن پارامتر هدایت الکتریکی در اکثر منابع آب مورد استفاده در حوضه مورد مطالعه (۳۵۴ منبع) و وجود همبستگی بالای آن با شاخص‌های کیفیت آب، رابطه رگرسیون میان شاخص‌های کیفیت آب شرب و کشاورزی به‌عنوان متغیر وابسته و پارامتر هدایت الکتریکی به‌عنوان متغیر مستقل تعیین شد (جدول ۶) لذا با توجه ضریب تعیین تعدیل شده نزدیک به یک بین دو متغیر و همچنین معنی دار بودن رابطه رگرسیون (P-value = ۰/۰۰) اساس پارامتر هدایت الکتریکی در حوضه مورد مطالعه به‌دست آمد (جدول ۶). پس از بررسی صحت روش‌های درون‌یابی مورد استفاده در این تحقیق (جدول ۷)، پهنه‌بندی کیفیت منابع آب برای حوضه آبخیز سمنان با استفاده از ۳۵۴ منبع و

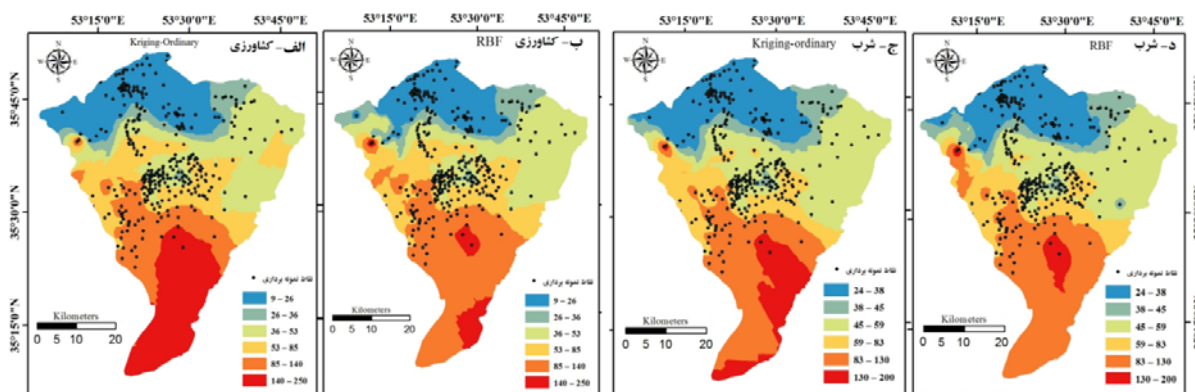
خطا، ریشه دوم مربعات خطا و درصد آن کوچک‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی و دقت بالاتر آن روش برای درون‌یابی در منطقه مورد مطالعه است. که در این منطقه با ۵۵ منبع اولیه و با دست داشتن کلیه پارامترهای مورد سنجش، روش کوکریجینگ و کریجینگ معمولی بهترین تخمین را برای شاخص کیفیت آب شرب و کشاورزی داشته‌اند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با توجه به کم بودن منابع مورد سنجش پارامترهای مورد نظر (۵۵ منبع) و پراکنش نامناسب آن در سطح منطقه مورد مطالعه، پهنه‌بندی برای کل منطقه مورد مطالعه با خطای زیادی همراه است. در این پژوهش با بررسی ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SPSS میان شاخص‌های کیفیت آب و پارامترهای مورد سنجش در ۵۵ منبع آب زیرزمینی، مشخص شد، بالاترین میزان همبستگی میان شاخص‌های کیفیت آب با هدایت الکتریکی (ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹۰ با درجه معناداری یک درصد) و کل مواد جامد

جدول ۶. معادله‌های رگرسیون لجستیک بین هدایت الکتریکی و کیفیت آب برای کاربری‌های شرب و کشاورزی

ردیف	متغیر مستقل	متغیر وابسته	Adjusted R ²	P-value	معادله رگرسیون
۱	هدایت الکتریکی	شاخص کیفیت آب شرب	۰/۹۸۹	۰/۰۰	$Y=20/278+0/014X$
۲	هدایت الکتریکی	شاخص کیفیت آب کشاورزی	۰/۹۸۰	۰/۰۰	$Y=4/714+0/019X$

جدول ۷. ارزیابی صحت روش‌های درون‌یابی شاخص کیفیت آب (برای ۳۵۴ منبع در سطح منطقه)

شاخص کیفیت	روش درون‌یابی	نوع	R ²	MAE	RMSE	% RMSE
کشاورزی	کریجینگ	ساده	۰/۷۶	۹/۸۷	۱۷/۸۴	۳۴/۷
		معمولی	۰/۷۷	۹/۲۸	۱۶/۷۸	۳۲/۶
		توان ۱	۰/۷۵	۱۰/۲۶	۱۷/۲۲	۳۳/۵
کشاورزی	RBF	Inverse Multiquadric	۰/۸۱	۹/۶۴	۱۴/۹۴	۲۹
		ساده	۰/۷۷	۷/۴۵	۱۲/۹۱	۲۳
شرب	کریجینگ	معمولی	۰/۷۹	۷/۰۱	۱۱/۹۰	۲۲
		توان ۲	۰/۷۶	۷/۵۷	۱۲/۷۰	۲۳
شرب	RBF	C- R- S	۰/۸۱	۷/۰۹	۱۱/۳۹	۲۱



شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی کیفیت منابع آب: الف) پهنه‌بندی کیفیت آب کشاورزی با روش Kriging-Ordinary، ب) پهنه‌بندی کیفیت آب کشاورزی با روش RBF، ج) پهنه‌بندی کیفیت آب شرب با روش Kriging-Ordinary و د) پهنه‌بندی کیفیت آب شرب با روش RBF

قابل ملاحظه‌ای در تحلیل مکانی آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی کیفیت آن دارند. منابع آب، مهم‌ترین عامل مورد بررسی برای توسعه در کشور است و کیفیت آب در کنار کمیت آن، نقش مهمی را در توان سرزمین برای انواع توسعه دارد. لذا به‌منظور آمایش سرزمین و تخصیص بهینه کاربری اراضی، لازم است که نقشه پهنه‌بندی کیفیت آب نیز به‌عنوان یکی از فاکتورهای مهم در توان سرزمین، مورد استفاده قرار گیرد تا هر کاربری در

روش‌های کریجینگ معمولی و تابع پایه شعاعی به‌دست آمد (شکل ۳).

بحث و نتیجه‌گیری

نقشه‌های توزیع شاخص کیفیت آب بایستی در نحوه مدیریت آب و کاربرد آن مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد روش‌های درون‌یابی و از جمله زمین‌آمار توانایی

با به‌همراه دارد. کاهش شاخص RMSE، RMSE و افزایش ضریب تعیین R^2 برای ۳۵۴ منبع آب نسبت به ۵۵ منبع اولیه مؤید این موضوع است که تعداد نقاط نمونه‌برداری بیشتر با پراکنش بهتر منجر به افزایش کارایی روش‌های درون‌یابی می‌شود.

با توجه به بررسی شاخص‌های MAE، RMSE، RMSE % و R^2 روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ برای پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب کشاورزی و شرب در ۵۵ منبع اولیه مناسب‌تر از سایر روش‌ها هستند. همچنین برای پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب کشاورزی و شرب با استفاده از ۳۵۴ منبع مورد سنجش و پراکنده در منطقه مورد مطالعه، با توجه به ضریب تعیین بزرگ‌تر و RMSE% کوچک‌تر، روش کریجینگ معمولی و توابع پایه شعاعی مناسب‌تر از سایر روش‌ها هستند. در بررسی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی کیفیت منابع آب پژوهش‌های زیادی صورت پذیرفته است (۲، ۲۱، ۳۶، ۳۹، ۴۱ و ۴۳) و در هر پژوهشی، یکی از روش‌های درون‌یابی دارای دقت بیشتری بوده است، لذا نمی‌توان استفاده از یک روش مشخص را برای هر منطقه‌ای پیشنهاد داد بلکه برای هر منطقه با توجه به پراکنش نمونه‌ها و همچنین ویژگی‌های آماری از جمله چولگی، توزیع داده‌ها، میزان تغییرات مکانی پارامترهای مورد نظر و ... می‌توان از یکی از روش‌های درون‌یابی اعم از معین و زمین‌آمار که میزان دقت آنها بررسی شده است و دارای بالاترین دقت است استفاده کرد.

زمینی با مناسب‌ترین منبع آبی تخصیص یابد. همان‌طور که از نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب مشخص است، مناطق شمالی حوضه دارای آب با کیفیت بهتری نسبت به سایر مناطق است و هرچه به سمت جنوب حوضه مورد مطالعه حرکت می‌شود، به‌دلیل عوامل زمین‌شناسی (قرارگیری بر بستر گندهای نمکی) و وجود آهک در این منطقه کیفیت منابع آب کاهش می‌یابد. لذا پیشنهاد می‌شود برای استفاده شرب از آب مناطق شمالی و برای کاربری کشاورزی از منابع آب شمالی و مرکزی منطقه استفاده شود.

در بسیاری از مناطق و حوضه‌های آبخیز به‌دلیل هزینه‌های بالای نمونه برداری و آنالیز نمونه‌ها، تعداد نمونه کافی برای پهنه‌بندی کل منطقه مورد مطالعه وجود ندارد و منجر به ایجاد دقت و صحت پایین‌تر در پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه می‌شود. لذا با توجه به راحتی و کم‌هزینه بودن اندازه‌گیری پارامتر هدایت الکتریکی و همچنین با توجه به همبستگی بالای شاخص‌های کیفیت آب با هدایت الکتریکی، با تعیین رابطه رگرسیون خطی، شاخص کیفیت آب برای کلیه منابع آب زیرزمینی (۳۵۴ منبع) بر اساس پارامتر هدایت الکتریکی به‌دست آمد. نتایج پژوهش‌های دیگر (۵، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۲۸، ۲۹ و ۳۲) نیز همبستگی بالا بین هدایت الکتریکی با سایر پارامترهای کیفیت آب را تأیید می‌کند. در این تحقیق با استفاده از ۳۵۴ منبع آب با پراکنش بهتر اقدام به پهنه‌بندی کیفیت آب برای کاربری‌های مختلف برای مدیریت منابع آبی شد که نتایج مطلوب‌تری

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour M., A. Javid, A. Hassani and Q. Kohbar. 2014. Preparing domestic water quality index. *Sustainability, Development and Environment* 2(3): 1-10 (In Farsi).
2. Adhikary, P. P., C. J. Dash, H. Chandrasekharan, T. Rajput and S. Dubey. 2012. Evaluation of groundwater quality for irrigation and drinking using GIS and geostatistics in a Peri-Urban area of Delhi, India. *Arabian Journal of Geosciences* 5(6): 1423-1434.
3. Annapoorna, H. and M. R. Janardhana. 2015. Assessment of groundwater quality for drinking purpose in rural areas surrounding a defunct copper mine. *Aquatic Procedia* 4(0): 685-692.
4. Arbatani, V., V. Ahmadi and M. Fattahi. 2009. Spatial variations modeling of the groundwater chemical properties by geostatistical methods. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 3(7): 23-34 (In Farsi).
5. Asghari Moghaddam, A. and M. Vadiati. 2016. Groundwater quality ranking of sarab plain for drinking purpose using entropy method. *Knowledge of Water and Soil* 26(3): 1-13 (In Farsi).
6. Ayoubi, S. and M. Hossein Alizadeh. 2007. Assessment spatial variability of soil erodibility by using of geostatistic

- and GIS (case study: MEHR watershed of Sabzevar). *Iranian Natural Resource* 60(2): 369-382(In Farsi).
7. Buckley, J. J. 1985. Fuzzy hierarchical analysis, *Fuzzy Sets System* 17: 233-247.
 8. Chang, D. Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research* 95(3): 649-655.
 9. Chauhan, A., M. Pawar and S. A. Lone. 2010. Water quality status of golden key lake in Clement Town, Dehradun, and Uttarakhand. *Journal of American Science* 6(11): 459-464.
 10. Chin, D. A. 2013. *Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes in the Water Environment*, 2nd Edition. Wiley. USA.
 11. Daraigan, S. G., A. S. Wahdain, A. S. BaMosa and M. H. Obid. 2011. Linear correlation analysis study of drinking water quality data for Al -MukallaCity, Hadhramout, Yemen. *International Journal of Environmental Sciences* 1(7): 1692-1701.
 12. Delbari, M., P. Afrasiab and S. Miremadi. 2010. Spatio-temporal variability analysis of groundwater salinity and depth (case study: Mazandaran province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(3): 359-374 (In Farsi).
 13. Fakhri, M. S., A. Asghari Moghaddam and M. Najib. 2016. Application of statistical methods and saturation indices in groundwater quality assessment of the Marand plain. *Water and Soil Conservation* 22(6): 117-133(In Farsi).
 14. Fathi Hafshejani, A., H. BegiHarchegani, A. Davoodiyan Dehkordi and S. H. Tabatabaei. 2014. Comparison of spatial interpolation methods and selecting the appropriate method for mapping of nitrate and phosphate in the Shahrekord Aquifer. *Irrigation and Water Engineering* 15(4): 51-63 (In Farsi).
 15. Fetouani, S., M. Sbaa, M. Vanclooster and B. Bendra. 2008. Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (North-East Morocco). *Agricultural Water Management* 95: 133-142.
 16. Fulazzaky, M. A., W. Seong Teng, M. Masirin and M. Idrus. 2010. Assessment of water quality status for the Selangor River in Malaysia. *Water, Air and Soil Pollution* 205:63-77.
 17. Gajendran, C. 2011. Water quality assessment and prediction modelling of nambiyar river basin, Tamil nadu, India. PhD. Thesis. Faculty of Civil Engineering Anna University. India.
 18. Gogus, O. and T.O. Boucher. 1997. A consistency test for rational weights in multi criterion decision analysis with fuzzy pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems* 86: 129-138.
 19. Hassan Khan, H., A. Khan, S. Ahmed and J. Perrin. 2011. GIS-based impact assessment of land-use changes on groundwater quality: study from a rapidly urbanizing region of South India. *Environmental Earth Sciences* 63(6): 1289-1302.Hengel, T., G. B. M. Huvelink and A. Stein. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variabls based on regression-kriging. *Geoderma* 120: 75-93.
 20. Institute of Standards and Industrial Researches of Iran. 2010. Drinking Water Standard - Physical and Chemical Properties. National Iranian Standard 1053. Fifth revision. Tehran (In Farsi).
 21. Integrated Management Plan of Hablehroud Watershed. 2013. Land Capability Evaluation and Land Use Planning for Integrated Management of Hablehroud Watershed. Organization of Forests, Pastures and Watershed. Puneh Publications Tehran. (In Farsi).
 22. Jafar Ahamed, A., S. Ananthakrishnan, K. Loganathan and K. Manikandan. 2013. Assessment of groundwater quality for irrigation use in Alathur Block, Perambalur District, Tamilnadu, South India. *Applied Water Science* 3(4): 763-771.
 23. Khandouzi, F., A. Pari Zangane, A. Zamani and Y. Dadban Shahamat. 2015. Survey of hydro-geochemical quality and health of groundwater in ramian, Golestan Province, Iran. *Health Research in Community* 1(3): 41-52. (In Farsi).
 24. Khosravi, Y. and A. Abbasi. 1394. *Spatial Analysis of Environmental Data with GeoStatistics*. Azar Kalak Publications. Zanjan. (In Farsi).
 25. Laarhoven, P. J. M. and W. Pedrycz. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets System* 11: 229-241.
 26. Merati, A., A.Taheri and N. Parsafar. 2018. Qualitative zoning of groundwater resources using geostatistical and GIS methods (case study: soleymanshah watershed). *Water and Soil Science* 27(2): 237-248. (In Farsi).
 27. Mohammadi, H. and M. Dare. 1394. Investigation of internal correlations between quality indices and electrical conductivity in a case study (Dasht Rudan). In: Proceeding of the National Conference of Civil Engineering and Geology. Islamic Azad University, Aligudarz Branch. (In Farsi).
 28. Muthulakshmi, L., A. Ramu, N. Kannan and A. Murugan. 2013. Application of correlation and regression analysis in assessing ground water quality. *International Journal of ChemTech Research* 15(1): 353-361.
 29. Neshat, A., B. Pardhan and M. Dadras. 2014. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Conservation and Recycling* 86: 74-86.
 30. Osati, K., A. Salajegheh and S. Arekhi. 2012. Spatial variation of nitrate concentrations in groundwater by geostatistics (case study: kurdan plain). *Range and Watershed Management* 65(4): 461-472 (In Farsi).
 31. Patela, J. Y. and M. V. Vaghanib. 2015. Correlation study for assessment of water quality and its parameters of par

- River Valsad, Gujarat, India. *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering* 2(2): 150-156.
32. Pawar, R.S., D. B. Panaskar and V. M. Wagh. 2014. Characterization of groundwater using water quality index of solapur industrial belt, Maharashtra, India. *International Journal of Research in Engineering & Technology* 2(4): 31-36.
33. Peiyue, L., W. Qian and W. Jianhua. 2011. Groundwater suitability for drinking and agricultural usage in Yinchuan area, China. *International Journal Of Environmental Sciences* 1(6):1241-1249.
34. Rezaei, M., K. Davatgar, K. Tajdari and B. Abolpour. 2010. Investigation the spatial variability of some important groundwater quality factors in Guilan, Iran. *Journal of Water and Soil* 24(5): 932-941 (In Farsi).
35. Salehi, H. and H. Zeinivand. 2015. Assessing groundwater quality and selection of the most appropriate spatial interpolation method (Case study: West of Marivan city, Iran). *Ecohydrology* 1(3): 153-166(In Farsi).
36. Shabani, M. 2008. Determine the most appropriate method of geostatistics in mapping groundwater pH and TDS (case study: Plain Arsanjan) *Water Resources Engineering* 1(1): 47-57 (In Farsi).
37. Soleimani, K., J. Zandi and S. Zandi. 2012. Evaluating the efficiency of geostatistical methods for mapping spatial distributions of springs TDS and PH (Case Study: Mirdeh Watershed, Kurdistan). *Environmental Study* 38(4): 57-66. (In Farsi).
38. Valizadeh, K., S. Roostaei, T. Rahimpour and M. Nokhostin Rohi. 2017. Determining the most appropriate geostatistical method for groundwater salinity mapping (Case Study: Shiramin Plain, East Azerbaijan Province). *Hydrogeomorphology* 2(6): 17-32 (In Farsi).
39. Wichapa, N. and P. Khokhajaikiat. 2017. Solving multi-objective facility location problem using the fuzzy analytical hierarchy process and goal programming: a case study on infectious waste disposal centers. *Operations Research Perspectives* 4: 39-48.
40. Yang, F. G., S. Y. Cao, X. N. Liu and K. J. Yang. 2008. Design of groundwater level monitoring network with ordinary Kriging. *Journal of Hydrodynamics* 3(20): 339-346.
41. Yazdanpanah, N. and A. R. Dejpasand. 2015. Spatial distribution of some groundwater properties of Kerman plain using geostatistical methods. *Watershed Management Research* 108: 14-25(In Farsi).
42. Zhehtabian, G. and M. Askari. 2007. Study and Spatial Analysis of Groundwater Quality in Garmsar Watershed. University of Tehran, Tehran. (In Farsi).

Groundwater Quality Zoning for Agricultural and Drinking Usage Using Water Quality Index and Geostatistics Techniques in Semnan Watershed

M. Ghandali¹, K. Shayesteh^{1*} and M. Sadi Mesgari²

(Received: November 8-2017 ; Accepted: April 29-2018)

Abstract

Determination of water quality is an essential issue in water resources management and its monitoring and zoning should be considered as an important principle in planning. In this study, in order to investigate the quality of groundwater resources (springs, wells and qanats) in Semnan watershed, first, the water quality index for drinking and agricultural purposes was obtained by means of measuring SO₄, Cl, Na, Mg, PH, EC, SAR, TDS in 55 groundwater sources. For calculating the parameters weight in WQI, the fuzzy hierarchy analysis process was used with the Chang's development analysis. Due to the lack of sampling points for zoning of the entire area, regarding the existence of EC data for the majority of groundwater resources used in this catchment (354 sources), as well as the high correlation (Adjusted R²=0.99) between WQI with EC, the mentioned indexes of other resources were estimated based on the regression relationship with EC. To analyze the spatial distribution and monitor the zoning of the groundwater quality, the ArcGIS version 10.3 and Geostatistical method such as simple Kriging and ordinary Kriging were used; additionally certain methods including Inverse distance weighting and Radial Basis Function were utilized. The performance criteria for evaluating the used methods including Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), %RMSE and R² were used to select the appropriate method. Our results showed that the ordinary Kriging and Radial Basis Function were the best methods to estimate the groundwater quality.

Keywords: Water Quality Index, Interpolation, Geostatistics, Kriging, Fuzzy hierarchy analysis

1. Department of Environment, Environment and Natural Resource Faculty, University Malayer, Malayer, Iran.

2. Department of GIS, Faculty of Mapping Engineering Industrial, University of Khaje Nasireddin Toosi, Tehran, Iran.

*: Corresponding Author, Email: ka_shayesteh@yahoo.com