اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۲، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۴، ص ۷۷-۶۳

ارزیابی روش‌های درون‌یابی و فازی در تخمین مقدار آرسنیک آب‌های زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: آبخوان دشت خوی)

نوید هوشنگی[۱]، علی‌اصغر آل‌شیخ[۲*]، عطاالله ندیری[۳]، اصغر اصغری مقدم[۴]

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی GIS، دانشکدهٔ ژئودزی-ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استاد گروه مهندسی GIS، دانشکدهٔ ژئودزی-ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار گروه علوم طبیعی، دانشکدهٔ علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

٤. استاد گروه علوم طبیعی، دانشکدهٔ علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۲٦ - تاریخ تصویب : ۹۳/۱۱/۱۸)

چکیده

بررسی و پهنه‌بندی دقیق غلظت فلزات سنگین و به‌ویژه آرسنیک در منابع آب زیرزمینی، تأثیر زیادی در برنامه‌ریزی و پایش مستمر منابع آب و جلوگیری از بروز مشکلات سلامت برای انسان‌ها دارد. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی روش نوین استنتاج فازیِ سوگنو و مقایسهٔ آن با روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، کریجینگ (ساده، عمومی و عادی) و کوکریجینگ در تخمین مقدار آرسنیک در محدودهٔ آبخوان دشت خوی بود. بررسی نتایج بعد از بهینه‌سازی المان های مؤثر در فرمول‌هایِ اجرای هر روش نشان داد که ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌علت تراکم کم و نحوهٔ چیدمان چاه‌های نمونه‌برداری برای همهٔ روش‌های درون‌یابی بالاست. در بین روش‌هایی که از داده‌های کمکی استفاده نمی‌کنند، روش‌های فازی سوگنو و IDW به‌ترتیب با RMSE برابر با ppb ۲٦/۵ و ppb ۲۸ در قیاس با روش‌های کریجینگ برآورد بهتری داشتند. استفاده از داده‌های کمکی کلر، سدیم و آهن، دقتِ روش‌های کوکریجینگ و فازی را نسبت به حالت تک‌متغیره به‌ترتیب ٤٦ و ۵۱ درصد بهبود بخشید. علت اصلی برتری ۱۹ درصدی روش فازی بر کوکریجینگ وابسته نبودن عملکرد روش فازی به نرمال بودن توزیع داده‌هاست. نتایج نشان داد که روش نوینِ فازی سوگنو در درون‌یابی مکانی انعطاف‌پذیرتر است و راحت‌تر و سریع‌تر (هم از نظر اجرای کاربر و هم به‌لحاظ نرم‌افزاری) اجرا می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، درون‌یابی، زمین‌آمار، فازی سوگنو.

* نویسندهٔ مسئول

Email: alesheikh@kntu.ac.ir

مقدمه

آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تغذیه در فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و مصارف خانگی است. این آب‌ها با خطرهای متفاوتی مانند آلودگی با آلاینده‌های طبیعی و غیرطبیعی روبه‌رو هستند [۱۵]. از جمله آلاینده‌های رایج در آب‌های زیرزمینی، فلزات سنگین و به‌ویژه آرسنیک است که به‌عنوان خطری جدی کانون توجه محققان قرار گرفته است [۵، ۶]. این گونه عناصر سمی در محیط زیست تمرکز می‌یابند و براساس ضریب تجمعی، جذب بدن انسان‌ها می‌شوند [۱]. میلیون‌ها نفر از مردم جهان در معرضِ آب آشامیدنی آلوده به آرسنیک قرار دارند که به‌طور طبیعی در آب‌های زیرزمینی وجود دارد [۱۲]. آلودگی آب آشامیدنی به آرسنیک، آبیاری با آب آلوده و مصرف مواد غذایی آلوده، تهدیدی جدی بر سلامت عمومی است و موجب افزایش بیماری‌های قلبی- عروقی، آسیب به سیستم عصبی، دیابت و سرطان می‌شود [۳۱]. آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان، آرسنیک موجود در آب آشامیدنی را در گروه اول عوامل سرطان‌زایی دستگاه تنفسی معرفی کرده است [۱۲]. بنابراین تخمین آلودگی می‌تواند به برنامه‌ریزی و مدیریت هر چه بهتر سلامت انسان‌ها کمک کند. تشخیص و تخمین صحیح شدت آلودگی آب‌ها تأثیر مهمی در تخصیص، استفاده، حفاظت و مدیریت منابع آبی دارد، زیرا ضمن ایجاد ساختاری برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزیِ منابع آبی، مانع آلودگی محیطِ آبی می‌شود [۲۶] و به یافتن عوامل مؤثر در آلودگی با توجه به همبستگی مکانی پدیده‌ها کمک می‌کند [۳۶]. در کشورهای در حال توسعه و جهان سوم، حفظ کیفی آبخوان‌ها کمتر مدنظر قرار می‌گیرد [۹]، هرچند که براساس فراخوان شرکت آب و فاضلاب روستایی در اکثر بخش‌های روستاییِ استان‌های سمنان، کردستان، کرمانشاه و گلستان ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در اولویت بوده است [۱۰]. در مناطقی از ایران در استان‌های کردستان، آذربایجان غربی و خراسان، آلودگی خاک و آب به آلایندهٔ آرسنیک گزارش شده است [۱۶] که با تخمین دقیق مکان و شدت آلودگی می‌توان اقدامات لازم را برای پیشگیری از مواجهه با خطر بیشتر، حفظ مزارع کشاورزی و در نتیجه ارتقای سلامت کیفی جامعه انجام داد [۱۱]. از جمله مشکلات در تعیین دقیق آلودگی آرسنیک می‌توان به پرهزینه بودن پایش، کمبود داده‌ها و بی‌دقتی روش‌های تخمین سطح اشاره کرد. داده‌های محیطی اغلب به‌صورت نقطه‌ای برداشت می‌شوند، اما مدیران به‌منظور مطالعه و تصمیم‌گیری در زمینهٔ علوم طبیعی، به سطح پیوسته‌ای از داده‌های محیطی نیاز دارند [۲۸]. به‌منظور تعمیم نتایج اندازه‌گیری‌شده از چاه‌های موجود به سایر نقاط فاقد آمار، باید شبکهٔ چاه‌ها از تراکم مناسبی برخوردار باشد تا از درون‌یابی استفاده شود. تحقیقات متعددی به ارزیابی و بررسی روش‌های درون‌یابی پرداخته و عوامل مؤثر بر عملکرد روش‌های درون‌یابی را بررسی کرده‌اند [۳۰]. در پهنه‌بندی مقادیر، نمونه‌های برداشت‌شدهٔ روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)[1]، کریجینگ عادی (OK)[2] و کوکریجینگ کلی (UK)[3] روش‌های غالب استفاده‌شده‌اند [۲۹]. در تکزاس[4] میزان تمرکز آرسنیک با استفاده از روش‌های IDW، کریجینگ و کوکریجینگ بررسی شده که در کوکریجینگ داده‌های ارتفاع و عمق چاه‌های پیزومتری را در درون‌یابی کوکریجینگ وارد کردند و تا حد قابل قبولی مقدار خطای پهنه‌بندی را کاهش دادند [۲۴]. در ایالت نووا اسکوتیای[5] کانادا با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی- محیطی و روش‌های زمین‌آماری، پس از مدلسازی مقدار آرسنیک و سرطان از روش IDW برای پهنه‌بندی نتایج استفاده کردند [۲۳]. روش بلوک رگرسیون کریجینگ[6] و بلوک کریجینگ عادی[7] با داده‌های کمکی DEM[8]، تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر زمین‌شناسی به‌منظور مدلسازی آرسنیک نیز مقایسه شده‌اند که با اختلافی ناچیز روش بلوک رگرسیون کریجینگ نتایج بهتری داشت [۲۷]. روش‌های تابع پایهٔ شعاعی[9] (اسپیلاین)، چندجمله‌ای محلی و جهانی از دیگر روش‌های دورن‌یابی‌اند. در این تحقیق با توجه به رایج بودن، از روش‌های IDW و کریجینگ [۲۸] استفاده شد. در داخل کشور نیز روش‌های درون‌یابی در تحقیقات زیادی به‌منظور بررسی و پهنه‌بندی کیفیت شیمیایی منابع آب شرب زیرزمینی استفاده شده است [۱۷، ۱۸]. در دشت شیراز پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب بررسی و با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS)[10] و درون‌یابی نقشهٔ نهایی کیفیت

1. Inverse Distance Weighting
2. Ordinary Kriging
3. Universal Kriging
4. Texas
5. Nova Scotia
6. Block Regression Kriging
7. Block Ordinary Kriging
8. Digital elevation model
9. Radial Based Function
10. Geospatial Information System

منابع آب تولید شد [۴]. صاحب جلال و همکاران (۲۰۱۲) از روش کریجینگ در پهنه‌بندی خصوصیات مختلف کیفی آب‌های زیرزمینی دشت بهاران مهریز بهره گرفتند و از همپوشانی نقشه‌های حاصل و براساس استانداردهای فائو، مناطق دچار محدودیت را شناسایی کردند. در دشت قزوین نیز کیفیت آب‌های زیرزمینی برای شرب بررسی شد که در آن برای پهنه‌بندی نتایج ابتدا همبستگی متغیرهای کیفی محاسبه و از داده‌هایی که همبستگی زیادی داشتند به‌عنوان دادهٔ کمکی در روش‌های کریجینگ عادی و نقطه‌ای استفاده شد [۱۵]. در سال‌های اخیر از مفهوم فازی در تخمین مکانی در علوم خاک، آب و هوا استفاده شده‌است [۳۷، ۳۴، ۳۳، ۲۰، ۱۹]. یکی از مزیت‌های روش فازی ترکیب اطلاعات عددی و متغیرهای زبانی به‌منظور مدیریت عدم قطعیت پارامترهای پیش‌بینی سیستم است؛ ازاین‌رو با توجه به‌لحاظ عدم قطعیت در روش‌های فازی، این روش‌ها دقت قابل قبولی ارائه می‌دهند [۳۷، ۳۳، ۲۰]. مقایسهٔ روش‌های فازی تاکاگی سوگنو[1] و کریجینگ عادی در مدلسازی نیترات نمایانگر برتری روش‌های فازی بود [۳۶]. در تحقیقات اخیر روش‌های درون‌یابی بیشتر به‌عنوان ابزاری در پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده شده و ارزیابی خودِ روش‌های درون‌یابی در تخمین مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی کمتر مورد توجه بوده است. از طرفی روش فازی سوگنو به‌عنوان روش نوین درون‌یابی در بررسی پراکندگی آرسنیک با توجه به تفاوت ماهیت آن با دیگر پارامترهای کیفی و نقش آن در سلامت انسان کمتر مدنظر بوده است. ازاین‌رو نوآوری و هدف اصلی این تحقیق ارزیابی روش فازی سوگنو و مقایسهٔ آن با روش‌های رایج درون‌یابی در تخمین دقیق مقدار آرسنیک به‌منظور بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی در محدودهٔ دشت خوی است.

مواد و روش‌ها

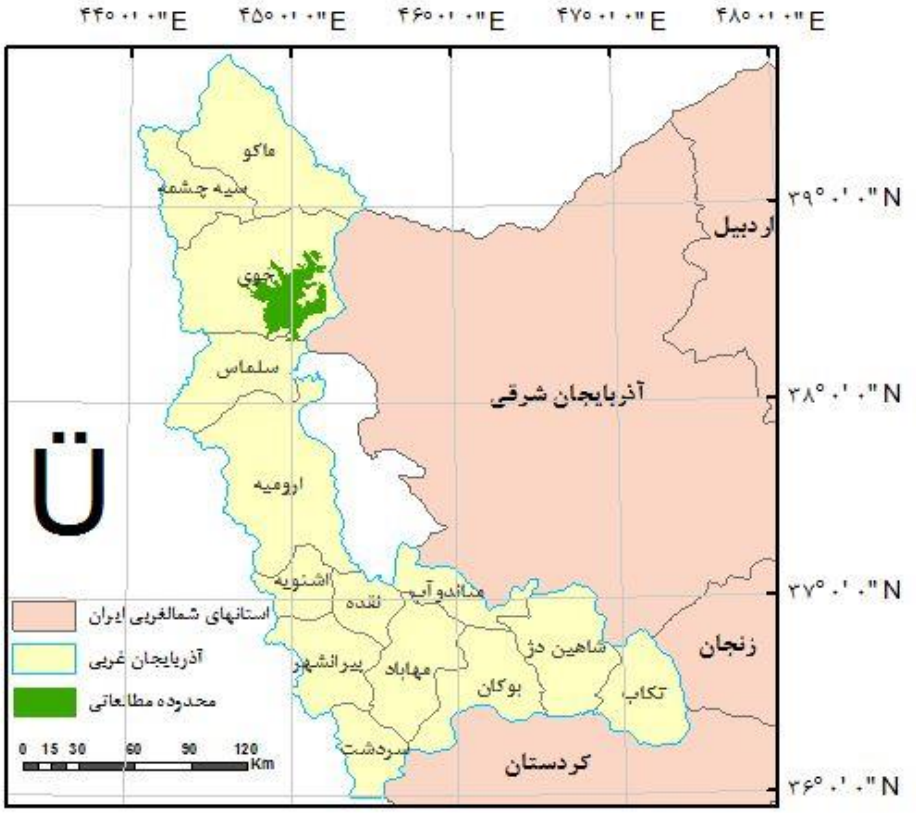
منطقهٔ تحقیق

دشت خوی با مساحت ۶۶۳ کیلومتر مربع یکی از مناطق حاصلخیز کشاورزی در شمال استان آذربایجان غربی است (شکل ۱). تغذیهٔ منابع آب زیرزمینی از طریق بارش، آبیاری و از طریق رودخانه‌های قطور، الند، قره‌سو، قوروغ بوغان و منابع آب زیرزمینی همجوار صورت می‌گیرد. تخلیهٔ منابع آب زیرزمینی دشت خوی نیز از طریق چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر و تعرق و رودخانه است. انحلال برخی از سنگ‌های دربرگیرنده و به‌خصوص سنگ‌های کربناته و به‌مقدار کم سنگ‌های تبخیری سبب تغییر کیفی منابع آب و افزایش غلظت برخی یون‌ها در ترکیب آب‌های دشت خوی شده است [۶]. آلودگی‌های آرسنیک در آب‌های زیرزمینی در برخی از دشت‌های ایران مانند هشتگرد، کردستان و آذربایجان غربی گزارش شده است که دشت خوی نیز در گروه دشت‌های آلوده قرار گرفته است [۷]، اما مقایسهٔ غلظت سایر عناصر (آرسنیک جزء موارد بررسی شده نبود) با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی در سالیان گذشته نشان می‌دهد که به‌جز آب‌های مناطق شمال شرقی دشت، اکثر نمونه‌ها کیفیت خوب و قابل قبولی برای شرب دارند [۳]. در این دشت با توجه به مشکلات مصرفی، طرح‌های تغذیهٔ مصنوعی آب‌های زیرزمینی و تبیین الگو و سازوکار جدید مدیریتی و بهره‌برداری از منابع زیرزمینی اولویت پیدا کرده است.

داده‌ها

در این تحقیق از داده‌های ۲۶ حلقه چاه دشت خوی که در مهر ۱۳۹۱ برداشت شده بود استفاده شد. این داده‌ها شامل داده‌های آرسنیک، مس، آهن، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، فلوراید و نیترات بود. با توجه به همبستگی زیاد داده‌های آرسنیک با کلر، سدیم و آهن در قیاس با داده‌های دیگر، از داده‌های کلر، سدیم و آهن به‌عنوان داده‌های ثانویه برای افزایش دقت روش‌های درون‌یابی استفاده شد؛ ازاین‌رو میزان همبستگی شاخصی برای انتخاب داده‌های کمکی برای تخمین آرسنیک درنظر گرفته شد. نتایج آنالیز همبستگی پیرسون در جدول ۱ و پراکندگی چاه‌ها و غلظت آرسنیک هر چاه در شکل ۲ آورده شده است. متوسط فاصلهٔ چاه‌های حفرشده در حدود ۵ کیلومتر است. حداکثر غلظت قابل‌قبول برای آب‌های آشامیدنی ۵۰ppb بوده و مقدار توصیه‌شدهٔ آن ۱۰ppb است که توسط سازمان WHO بیان شده است [۷].

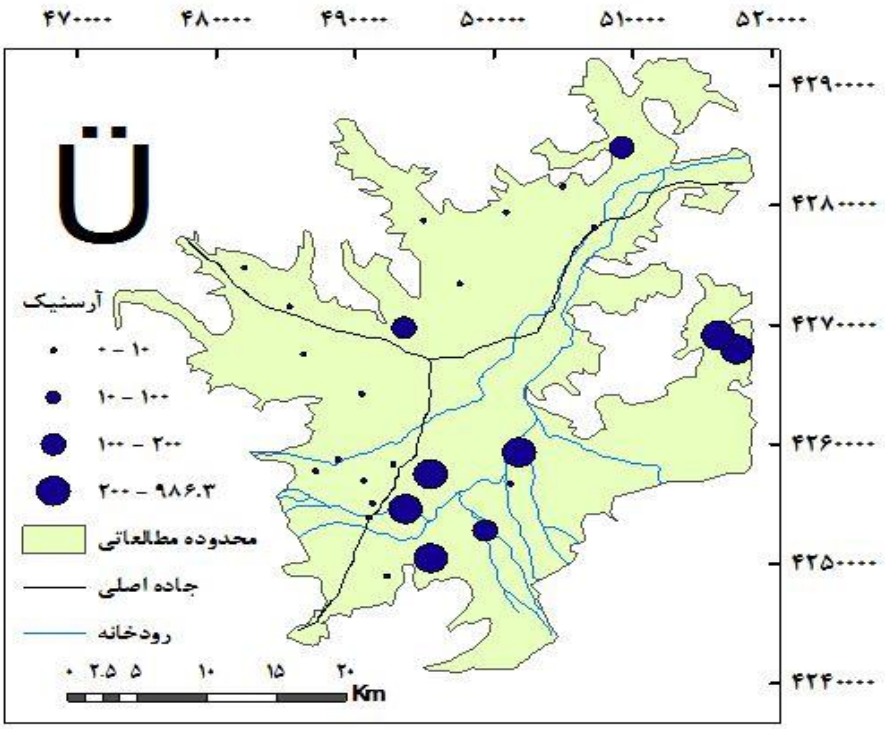
1. Takagi Sugeno Fuzzy Model



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

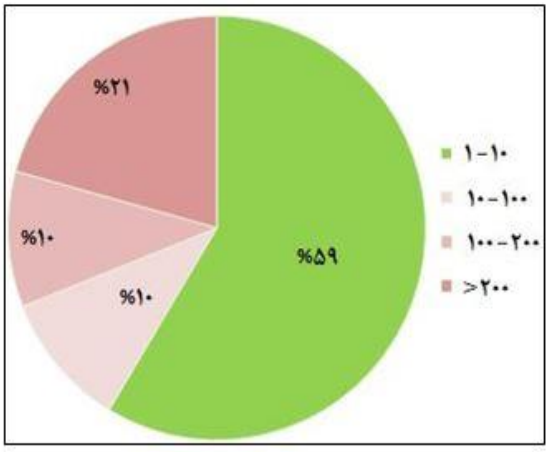
جدول ۱. نتایج آنالیز همبستگی پیرسون

آماره	نیترات	فلوراید	کلر	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	آهن	مس	آرسنیک
آرسنیک	۰/۲۷	۰/۱۲	**۰/۹**	۰/۲۳	**۰/۸۹**	۰/۲۸	۰/۳۶	**۰/۷۷**	**۰/۶۱**	۱
مس	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۵۸	۰/۳۷	**۰/۶۱**	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۴۶	۱	
آهن	۰/۱۲	۰/۱۰	**۰/۷۹**	۰/۳۲	**۰/۷۷**	۰/۲۴	۰/۲۶	۱		
کلسیم	۰/۵۸	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۲	۰/۳۴	**۰/۷۰**	۱			
منیزیم	۰/۳۳	**۰/۷۵**	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۳۱	۱				
سدیم	۰/۱۱	۰/۲۶	**۰/۹۸**	۰/۴۳	۱					
پتاسیم	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۴۰	۱						
کلر	۰/۲۱	۰/۱۶	۱							
فلوراید	۰/۱۶	۱								
نیترات	۱									



شکل ۲. نمایش گرافیکی پراکندگی و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری

شکل ۳ نشان‌دهندهٔ فراوانی آرسنیک در دشت خوی است. براساس محدوده‌های قیدشده در استانداردهای جهانی، غلظت آرسنیک ۵۹ درصد چاه‌ها بین ۰ تا ۱۰ واحد در بیلیون است و ۴۱ درصد چاه‌ها دارای آرسنیک بیش از حد مجازند.



شکل ۳. درصد فراوانی آرسنیک در چاه‌های منطقهٔ مطالعاتی

همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است آب‌های زیرزمینیِ بخش غربی دشت خوی، بیشترین کیفیت و بخش‌های جنوب شرقی این دشت، کمترین کیفیت آب‌های زیرزمینی را از لحاظ مقدار آرسنیک دارند. کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر غلظت آرسنیک از غرب به شرق در حال کاهش است. با توجه به دامنهٔ گستردهٔ تغییرات آرسنیک در این دشت، مستندسازی بیشتر میزان آلودگی آب‌های زیرزمینی و کنترل عوامل مبین کیفیت در آبخوان این دشت لازم و اساسی است.

درون‌یابی

روش‌های درون‌یابی مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی آماری است که مقادیر نامعلوم را از روی مقادیر نمونهٔ معلوم محاسبه می‌کند. درون‌یابی در سه مرحلهٔ اصلی آماده‌سازی و جست‌وجوی داده‌ها، استفاده از مدل‌های قطعی و زمین‌آماری، آنالیز و تفسیر نتایج انجام می‌گیرد [۲]. آماده‌سازی و جست‌وجوی داده‌ها شامل بررسی خلاصهٔ آماری داده‌ها، یافتن منابع خطا، بررسی توزیع داده‌ها و یافتن الگوی داده‌ها و بررسی دسته‌ای داده‌هاست [۲۱، ۲]. بعد از آماده‌سازی و جست‌وجوی داده‌ها، مدل‌های درون‌یابی انتخاب و بر روی مجموعه‌ای از داده‌ها اعمال می‌شود. نتایج به‌کارگیری روش‌های درون‌یابی با شیوه‌ها و فرمول‌های متفاوتی مقایسه می‌شوند [۲۸]. در ادامه به

توضیح روش‌های درون‌یابی استفاده‌شده و نحوهٔ مقایسهٔ آنها اشاره می‌شود.

روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)

روش وزن‌دهی معکوس فاصله، بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط فقط فاصله‌ها را مدنظر قرار می‌دهد و ترکیبی خطی (رابطهٔ ۱) از داده‌های موجود را برای پیش‌بینی مقادیر نامعلوم پیشنهاد می‌کند [۳۸].

$$Z(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i z_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} w_i = \frac{w_1}{\sum_{i=1}^{n} w_i} z_1 + \frac{w_2}{\sum_{i=1}^{n} w_i} z_2 + \ldots + \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} z_i \qquad (1)$$

در فرمول بالا z_i مقدار مشاهداتی، w_i وزن مقادیراست که از رابطهٔ $W=(1/d)^p$ به‌دست می‌آید. d فاصلهٔ نقطهٔ مجهول تا نقطهٔ اندازه‌گیری‌شده و p توان فاصلهٔ تأثیر است. این روش ایزوتروپیک است و اعداد به‌دست‌آمده در این روش محدود به دامنهٔ اعداد موجودند. نتیجهٔ مناسب زمانی به‌دست می‌آید که نمونه‌برداری متراکم و با توجه به تغییرات محلی باشد. در این روش هیچ فرضی برای داده‌های ورودی وجود ندارد و مناسب برای کار با داده‌های حجیم است. محاسبات در IDW به دو عامل انتخاب توان و تعداد همسایگی دخیل، وابسته است.

کریجینگ

روش‌های کریجینگ از خودهمبستگی و دیگر روابط آماری بین نقاط اندازه‌گیری‌شده برای تخمین مقادیر مجهول استفاده می‌کنند. فرمول کریجینگ شبیه IDW است؛ با این تفاوت که در IDW وزن‌ها فقط بر اساس فاصله‌اند، ولی در کریجینگ علاوه‌بر فاصله، چینش مکانی داده‌ها اساس محاسبهٔ وزن نقاط دخیل در برآورد نقاط مجهول است. در کریجینگ وزن‌ها به نوع مدل برازش‌شده و رابطهٔ مکانی میان مقادیر اندازه‌گیری‌شده بستگی دارد. روش‌های کریجینگ بر فرض نرمال بودن داده‌ها استوارند و قبل از اجرای روش‌های کریجینگ باید آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام گیرد. نرمال بودن داده‌ها با تحلیل‌های توصیفی (چولگی[1] و کشیدگی[2]) [۲۱] یا تحلیل‌های استنباطی (آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، شاپیرو ویلک) انجام می‌گیرد. اگر داده‌ها نرمال نباشند از تبدیل‌های لوگ[3] و باکس-کاکس[4] استفاده می‌کنند [۸]. پس باید تبدیل داده‌ها به‌عنوان بخشی از مدل درون‌یابی لحاظ شود. کریجینگ براساس نظریهٔ متغیر ناحیه‌ای است. نظریهٔ متغیر ناحیه‌ای بیان می‌کند که تغییرات فضایی هر متغیر با جمع دو مؤلفهٔ اصلی و یک مؤلفهٔ خطا بیان می‌شود [۱۳]. ازاین‌رو، فرض می‌شود که تفاضل مقدار متغیر ناحیه‌ای در دو نقطه از فضا، به فاصلهٔ آن دو از هم بستگی دارد. اگر سطح مورد نظر، فرض متغیر ناحیه‌ای را نداشته باشد، معادلهٔ کریجینگ بسط‌پذیر نیست و باید روند[5] حذف شود [۲]. مشخص کردن روابط همبستگی با مدل کردن سیمی‌واریوگرام صورت می‌گیرد. مراحل اصلی بعد از محاسبهٔ سیمی‌واریوگرام برازش دادن مدل تجربی به نقاط است. این مرحله مهم‌ترین گام برای رسیدن از تفسیر داده‌های مکانی به پیش‌بینی مکانی است. مدل‌های برازشی موجود دایره‌ای[6]، کروی[7]، نمایی[8]، گوسین[9] و خطی[10] است. انواع مختلف کریجینگ فرضیات خاص خود را دارند. در کریجینگ ساده فرض می‌شود که پارامترهای روند کاملاً شناخته شده است. این فرض در اکثر پدیده های طبیعی صادق نیست. کریجینگ عادی بر این فرض استوار است که میانگین ثابت در متغیر ناحیه‌ای، معلوم نیست. یکی از مسائل اصلی در استفاده از کریجینگ عادی این است که آیا فرض بالا معقول است یا خیر. این روش را در داده‌های دارای روند محلی یا مقطعی می‌توان استفاده کرد. کریجینگ عمومی (جهانی) در واقع تلفیق روش کریجینگ عادی با روند محلی است و برخلاف کریجینگ عادی که فرض می‌شد روند تغییرات میانگین در تمام ناحیه ثابت است، کریجینگ عمومی فرض می‌کند که روندی برجسته در داده‌ها وجود دارد که آن را می‌توان با یک تابع قطعی مانند چندجمله‌ای یافت. برای تخمین صحیح با روش‌های زمین‌آماری کریجینگ، باید فرضیه‌های ذکرشده برقرار باشد؛ در غیر این صورت، نتایج اطمینان‌بخش نخواهند بود

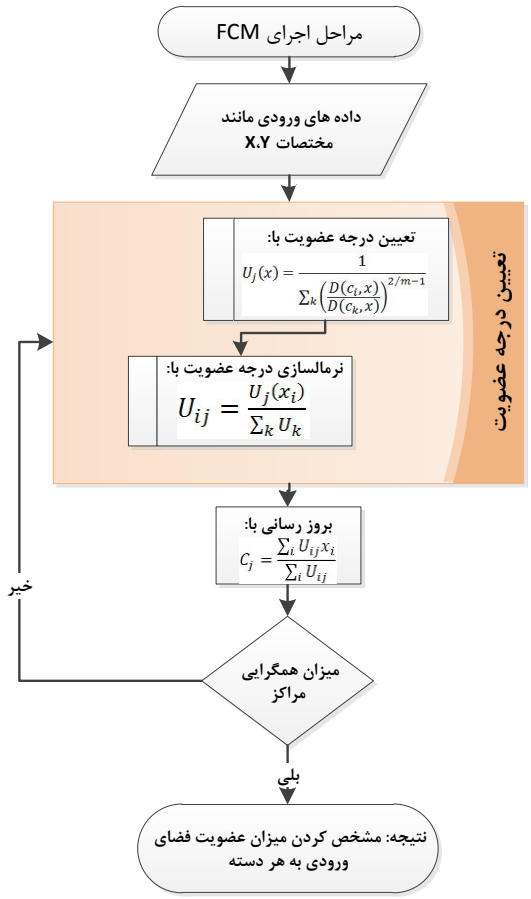
1. Skewness
2. Kurtosis

3. Log
4. Box-Cox
5. Trend
6. Circular
7. Spherical
8. Expotential
9. Gaussian
10. Liner

[۲]. در روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری، کوکریجینگ شبیه روش های چندمتغیره است که براساس همبستگی بین متغیرهای مختلف مجهولات را برآورد می‌کند [۲]. برای برآورد با این روش و برای محاسبهٔ اوزان نیاز به محاسبهٔ کوواریوگرام[1] است. در روش کوکریجینگ، پس از تشکیل ماتریس همبستگی، برای پیش‌بینی ویژگی‌های کیفیت آب از متغیر کمکی که بیشترین ضریب همبستگی با متغیر مورد نظر را دارد استفاده می‌شود.

روش فازی سوگنو

یکی از دسته‌های اصلی مدل‌های فازی، سیستم فازی سوگنو است [۳۲]. از مزایای این روش می‌توان به اجرای سادهٔ آن بر روی انواع مختلف داده اشاره کرد [۲۵]. مراحل اجرای سوگنو شامل دسته‌بندی (تعیین ساختار)، تعیین قوانین و تخمین پارامتر است. در این تحقیق به‌منظور مشخص کردن ساختار و دسته‌بندی داده‌ها از روش دسته‌بندی FCM [2] استفاده می‌شود [۳۶]. در روش دسته‌بندی فازی برای مجموعه‌ای از داده‌ها ($\{x_1, x_2, \ldots, x_n\} \in \mathbb{R}$) ابتدا مراکز دسته‌ها ($\{C_1, C_2, \ldots, C_m\} \in \mathbb{R}$) تعیین می‌شوند. مراکز دسته‌ها هم‌بُعد با داده‌ها هستند و تعدادشان کمتر از داده‌هاست. دادهٔ X_i در این طبقه‌بندی به دسته‌ای مربوط است که به مرکز آن دسته نزدیک‌تر باشد. دسته‌بندی فازی C-Means در واقع حالت فازی K-Means است که در آن رقابت برای در اختیار گرفتن دسته‌ها به‌صورت فازی انجام می‌گیرد. برای طبقه‌بندی m تایی داده‌ها، m مرکز دسته به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس مرکز ثقل داده‌ها را در هر دسته می‌یابند و مرکز قبلی را به مرکز ثقل آن دسته انتقال می‌دهند و این فرایند ادامه می‌یابد. برخلاف روش K-Mean که انتخاب مرکز دسته‌های اولیه تأثیر زیادی در نتیجه دارد، این مشکل برای C-Means کمتر رخ می‌دهد. مراحل اجرای دسته‌بندی فازی (FCM) در شکل ۴ نشان داده شده است. با استفاده از دسته‌بندی فازی و استخراج مجموعه‌ای از قوانینی که رفتار داده‌ها را مدل می‌کنند، می‌توان یک سیستم استنتاج فازی (FIS) ایجاد کرد. این سیستم نیازمند ورود داده‌های اولیه به‌صورت فازی است. در سیستم استنتاج فازی سوگنو بعد از دسته‌بندی داده‌ها و در قسمت تالی برای هر دستهٔ فازی تابعی به‌صورت ثابت یا خطی برازش داده می‌شود. در قسمت قوانین نیز هر دستهٔ طبقه‌بندی‌شده به تابع برازش‌داده‌شده در بخش تالی متصل می‌شود. در نهایت با توجه به میزان عضویت هر داده به دسته‌های طبقه‌بندی‌شده و مفاهیم فازی سوگنو مقدار خروجی تخمین زده می‌شود.



شکل ۴. مراحل اجرای روش دسته‌بندی فازی (FCM) – D فاصلهٔ اقلیدسی، C_j مراکز دستهٔ j، U_j درجهٔ عضویت به دستهٔ j، k تعداد دسته‌های نهایی

معیارهای ارزیابی روش‌های درون‌یابی

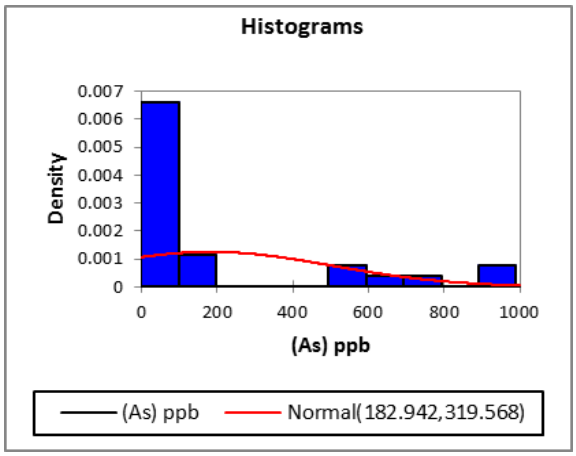
اساس روش‌های ارزیابی این است که تعدادی از نقاط حذف و درون‌یابی با بقیهٔ نقاط انجام می‌گیرد و مقادیر نقاط حذف‌شده با مدل ارائه‌شده محاسبه می‌شوند و در نهایت مقادیر محاسبه‌شده و موجود برای هر مدل مقایسه می‌شوند. به حالتی که نقاط به‌صورت دسته‌ای حذف شوند

1. Covariogram
2. Fuzzy C-Means

اعتبارسنجی[1] و به حالتی که نقاط یک به یک حذف شوند اعتبارسنجی متقابل[2] گویند [۲]. اعتبارسنجی متقابل در قیاس با اعتبارسنجی عملکرد بهتری دارد، زیرا کل مدل را بررسی می‌کند و با توجه به تعداد کم داده‌ها، نیازی به حذف دسته‌ای اطلاعات ندارد. فرمول‌های غالب ارزیابی مدل‌ها، میانگین مطلق اشتباهات (MAE)[3]، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)[4]، میانگین اریبی اشتباهات (MBE)[5] و R^2 (ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی) است [۳۰]. RMSE مهم‌ترین کمیت آماری ارزیابی مدل‌های درون‌یابی است که به داده‌های پرت[6] حساس است. هر چه مقدار این کمیت به صفر نزدیک باشد، خطا کمتر خواهد بود [۳۵]. MAE در حالت مطلوب باید صفر باشد؛ مقادیر مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ بیش‌برآورد و برآورد نقصانی (کمتر از مقدار واقعی) است. این پارامتر معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست [۳۶]. MBE نیز نشان‌دهندهٔ میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده است و برای تدقیق میزان برآورد استفاده می‌شود [۱۵]. MAE و MBE هر دو میزان اریبی یا صحت را نشان می‌دهند. از R^2 برای تخمین قابلیت اطمینان نتایج استفاده می‌کنند. در اعتبارسنجی متقابل مقدار R^2 مثبت و بین ۰ و ۱ است؛ هر چه مقدار R^2 بزرگ‌تر و نزدیک به یک باشد بهتر بوده و نتایج تخمین صحیح‌تر است.

نتایج و بحث

قضاوت در مورد عملکرد یک روش، قبل از بهینه‌سازی آن صحیح نیست. روش وزن‌دهی معکوس فاصله با پارامترهای توان، تعداد همسایگی و نحوهٔ انتخاب همسایگی بهینه می‌شود. پیاده‌سازی IDW برای تخمین آلودگی آرسنیکی آب‌های زیرزمینی دشت خوی با توان ۱، همسایگی ۶ و با RMSE ۲۸/۱۶ (ppb) بهینه شد. در روش کریجینگ، نرمال‌سازی داده‌ها، عاملی تعیین‌کننده است. در این تحقیق برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از تحلیل‌های توصیفی و استنباطی استفاده شد. مقدار چولگی مشاهده‌شده برابر با ۲/۵۷ و مقدار کشیدگی داده‌ها ۳/۰۳- برآورد شد. ازاین‌رو داده‌ها نرمال نبودند (شکل ۵).



شکل ۵. نمودار توزیع داده‌ها

آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف[7] و شاپیرو- ویلک[8] نیز در سطح اطمینان ۵ درصد، فرض نرمال بودن داده‌ها را رد کردند. در این مطالعه روش نرمال‌سازی از کارهای باتاچارجی و همکاران [۲۱]، لی و هیپ [۲۸] و صاحب‌جلال و همکاران [۱۱] اقتباس شده است. در تحقیقات دیگری از Box-Cox نیز استفاده کرده‌اند [۲۲]، که در این تحقیق با توجه به صفر بودن برخی از داده‌ها از لوگ انتقالی استفاده شد [۲۴،۲۷]. در این تحقیق برای پیاده‌سازی روش کریجینگ از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. در این نرم‌افزار تبدیل log وجود داشت، اما با توجه به وجود داده با مقدار صفر، تبدیل توزیع داده به نرمال امکان‌پذیر نشد. ازاین‌رو برای نرمال‌سازی از تابع $\ln(۰/۱\times As+۱۴۰)$ در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. بعد از تبدیل مربوط و با اینکه چولگی و کشیدگی داده‌ها در محدودهٔ مجاز (۲, ۲-) که البته ممکن است بعضی از آماردانان این بازه را کوچک‌تر یا بزرگ‌تر در نظر بگیرند [۱۱] قرار گرفت، همچنان نتایج آزمون‌های آماری در سطح اطمینان ۵ درصد توزیع متغیر را نرمال برآورد نکردند.

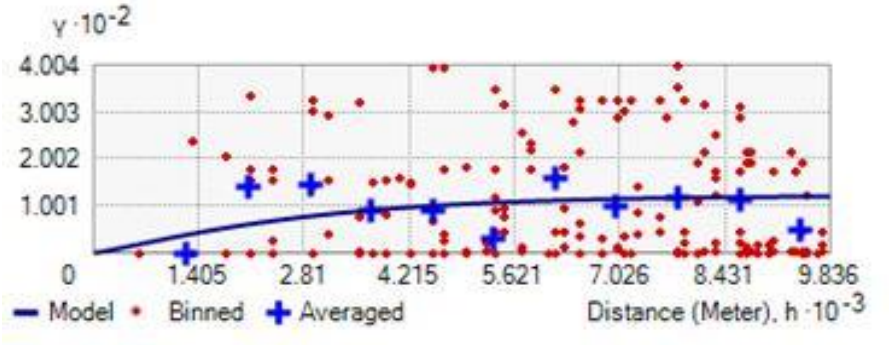
آنالیز روند انجام‌گرفته نشان از وجود روند مرتبهٔ اول در داده‌های آرسنیک دشت خوی داشت. در روش‌های کریجینگ برای تأمین پیش‌فرض، متغیر ناحیه‌ای ترند مرتبهٔ اول حذف شد. شکل‌های ۶ و ۷، واریوگرام های

1. Validation
2. Cross validation = Leave one out cross validation
3. Mean Absolut Error
4. Root Mean Square Error
5. Mean Bias Error
6. Outlier
7. Kolmogorov–Smirnov Test
8. Shapiro-Wilk

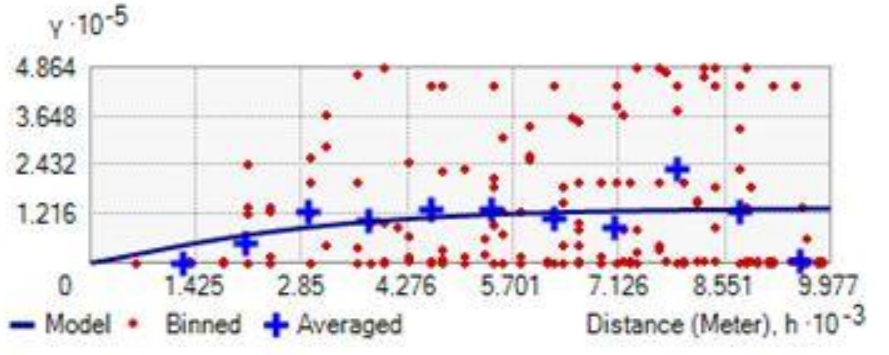
برازش‌داده‌شده در روش کریجینگ ساده و عادی را نشان می‌دهند. در این تحقیق برازشِ واریوگرام با تابع نمایی بهترین نتیجه را داشت. منحنی‌های برازش‌داده‌شده نشان از وجود همبستگی بین داده‌ها داشت و امکان درون‌یابی به‌روش کریجینگ را نشان داد. محور افقی این اشکال فاصله، و محور عمودی نشان‌دهندهٔ سیمی‌واریوگرام است.

با توجه به اینکه در دشت خوی تراکم داده‌ها زیاد نیست، به‌منظور جبران کمبود داده‌ها از داده‌های کمکی کلر، سدیم و آهن نیز در روش کوکریجینگ استفاده شد. برای مشخص کردن داده‌های کمکی از آنالیز همبستگی استفاده شد [۱۵]. تعیین همبستگی و ارتباط عناصر کمک شایان توجهی به تحلیل صحیح شرایط موجود و انتخاب داده‌های کمکی می‌کند. هر چه همبستگی داده‌ها بیشتر باشد خطای برآورد کاهش می‌یابد [۲۸]. با درنظر گرفتن این نکته که در بیشتر مطالعات زیست‌محیطی همبستگی ۰/۶ و بالاتر از آن، ارتباط قوی بین دو یا چند عنصر به‌شمار می‌رود [۱]، در این تحقیق از داده‌هایی با همبستگی بیشتر از ۰/۷ استفاده شد (جدول ۱). برخلاف نتایج تحقیقات [۲۷، ۲۴]، همبستگی مقدار آرسنیک با ارتفاع منطقه اثبات نشد؛ ازاین‌رو در این تحقیق از DEM به‌عنوان دادهٔ کمکی در تخمین مقادیر استفاده نشد. در روش فازی سوگنو مختصات (x ،y) و نیز کلر، سدیم و آهن هر کدام جداگانه به‌عنوان ورودی وارد محاسبات شدند. در این روش نیز همچون روش‌های قبلی ابتدا سطح با استفاده از ۲۵ داده (از ۲۶ چاه موجود) ایجاد و مقدار برآوردشده برای چاه باقی‌مانده از سطح حاصل با مقدار برداشت‌شدهٔ زمینی مقایسه شد، این کار برای اعتبارسنجی متقابل ۲۶ بار تکرار و محاسبات مربوط در نرم‌افزار متلب صورت گرفت. در روش فازی سوگنو داده‌ها به چهار دسته تقسیم و برای ایجاد قوانین فازی، از تابع عضویت گوسین استفاده شد (شکل ۸).

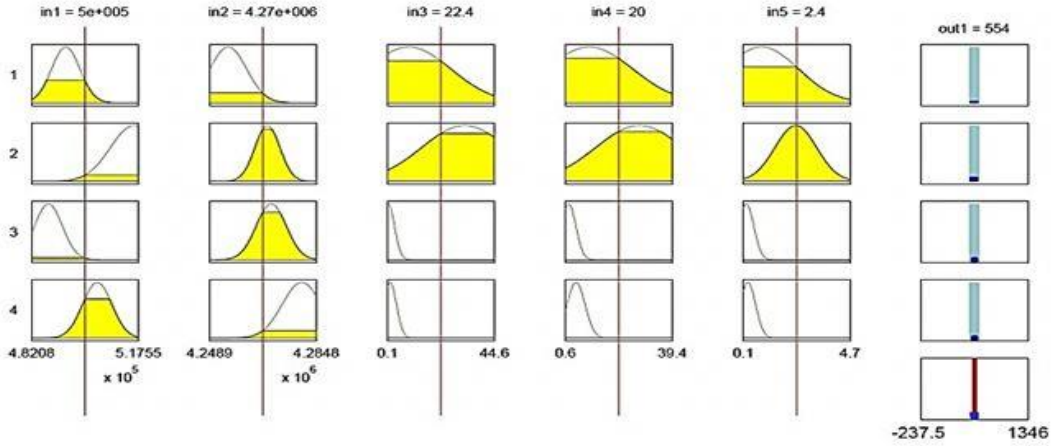
تعداد چهار دسته، حالت بهینهٔ به‌دست‌آمده از اجرای تابع FCM در نرم‌افزار متلب بود. شکل۹ تقسیم منطقه به چهار دستهٔ فازی را نشان می‌دهد. تالی سیستم فازی سوگنو خطی در نظر گرفته شد و ضرایب آن با روش کمترین مربعات به‌دست آمد.



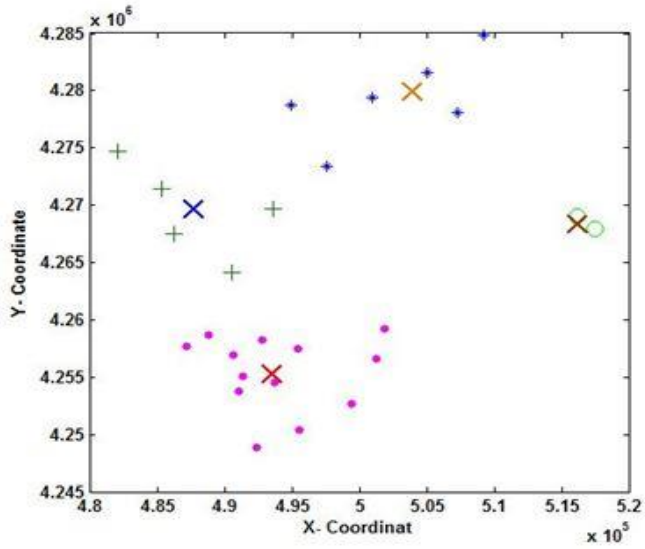
شکل ۶. واریوگرام برازش‌داده‌شده در OK



شکل ۷. واریوگرام برازش‌داده‌شده در SK



شکل ۸. قوانین فازی ایجادشده در روش فازی شوگنو



شکل ۹. دسته‌بندی فازی منطقهٔ مطالعاتی به ۴ کلاس

نتایج نهایی اجرای روش‌های درون‌یابی در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. جدول ۲ نتایج صحت‌سنجی روش‌های درون‌یابی را که از داده‌های کمکی استفاده نکرده‌اند و جدول ۳ نتایج روش‌هایی را که از داده‌های کمکی کلر، سدیم و آهن استفاده کرده‌اند نشان می‌دهد.

جدول ۲. روش‌های درون‌یابی تک‌متغیره بدون دادهٔ کمکی

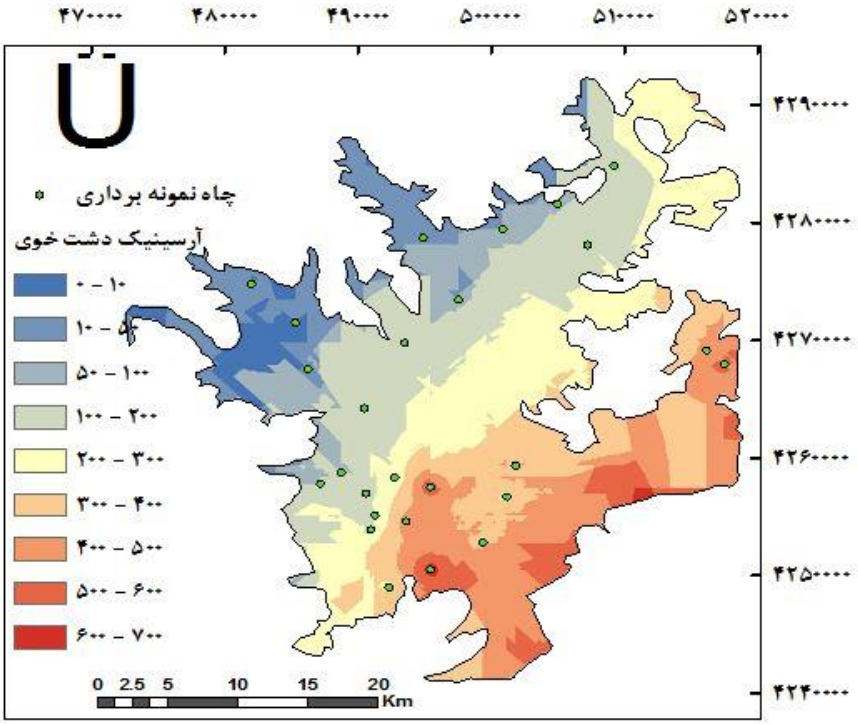
روش اعمال‌شده	RMSE (PPb)	MBE (PPb)	MAE (PPb)	R^2
IDW	۲۸/۱۶	-۲/۹۷	۱۹/۲۴	۰/۵۳
SK	۲۹/۰۸	-۳/۹۹	۲۳/۳۲	۰/۵۸
OK	۲۹/۴۸	-۱۵/۸۴	۱۸/۲۵	۰/۶۰
UK	۲۹/۵۳	۸/۶۹	۲۲/۶۹	۰/۵۶
FIS	۲۶/۵۵	۱/۹۴	۲۰/۶۳	۰/۶۵

جدول ۳. نتایج روش‌های درون‌یابی چندمتغیره (کوکریجینگ و فازی) با داده‌های کمکی

روش اعمال‌شده	RMSE (PPb)	MBE (PPb)	MAE (PPb)	R^2
CO-CL	۲۲/۲۴	-۸/۴۷	۱۷/۲۶	۰/۸۵
CO-CL& Na	۲۱/۵۹	-۸/۲۱	۱۸/۵۱	۰/۶۹
CO-CL& Fe	۱۵/۲۴	-۱/۳۶	۱۰/۰۲	۰/۷۹
CO-CL& Na& Fe	۱۵/۹۸	-۸/۳۸	۱۱/۱۹	۰/۸۶
FIS-CL	۱۳/۳۴	-۰/۱	۸/۴۱	۰/۸۳۳
FIS-CL& Na	۱۳/۲۹	۰/۲۳	۸/۷۱	۰/۸۲۷
FIS-CL& Fe	۱۳/۰۲	-۰/۴۴	۸/۵۱	۰/۸۲۸
FIS-CL& Na& Fe	**۱۲/۹۲**	۰/۰۰	۸/۵۴	۰/۸۳

مقایسهٔ نتایج

عوامل متعددی مانند تراکم شبکهٔ نمونه‌برداری، نوع توزیع داده‌ها و دقت داده‌ها نتایج روش‌های درون‌یابی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و یافته‌های ثابتی دربارهٔ عوامل موثر و حد تأثیر هر عامل وجود ندارد [۲۹]. ازاین‌رو تفسیر جامع نتایج می‌تواند در درک عوامل مؤثر در روش‌های درون‌یابی، کنترل و استفادهٔ بهینهٔ این روش‌ها راهگشا باشد. همان‌گونه که در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، خطای RMSE برای همهٔ روش‌های درون‌یابی زیاد است که علت آن ممکن اسن چیدمان ایستگاه‌های نمونه‌برداری و چگالی کم چاه‌های نمونه‌برداری در دشت خوی باشد؛ زیرا چیدمان ایستگاه‌های نمونه‌برداری در درک صحیح ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضهٔ آبخیز تأثیر عمیق و مستقیمی دارد [۳۰]. افزون‌بر آن، هر چه چگالی داده‌ها کمتر باشد، فرضیه‌های روش‌های درون‌یابی بیشتر مدنظر قرار می‌گیرد و اختلاف بین روش‌ها بیشتر می‌شود [۲۸].تراکم ناکافی شبکهٔ نمونه‌برداری در همهٔ روش‌های ارزیابی MAE، MBE و R^2 نمود داشته است، زیرا هنگام اعتبارسنجی متقابل برای داده‌های موجود در حاشیه برون‌یابی انجام می‌گیرد و موجب افزایش مقدار خطا در نقاط حاشیهٔ شبکه می‌شود و نتایج ارزیابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بین روش‌هایی که از داده‌های کمکی استفاده نمی‌کنند (جدول ۲)، روش‌های کریجینگ در مقایسه با روش‌های فازی و IDW تخمین بدتری داشته‌اند. علل اصلی تخمین غیردقیق آرسنیک با روش‌های کریجینگ را می‌توان حاصل نشدن پیش‌فرض نرمال توزیع داده‌ها حتی پس از تبدیل لوگ دانست. هر چند که کم بودن تعداد داده‌ها از دیگر عواملی است که نتایج این روش‌ها را تحت تأثیر قرار داده است [۳۶]. با توجه به اینکه نرمال نبودن توزیع داده‌ها نتایج IDW و فازی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد، روش‌های IDW و FIS نتایج بهتری داشتند، به‌عبارت بهتر با توجه به اینکه در IDW و FIS نیازی به پیش‌فرض نرمال نیست، این دو روش نتایج بهتری داشتند. این نتیجه در تحقیق گُنگ و همکاران [۲۴]، و توتمِز و هتیپ‌اوغلو [۳۶] نیز مشاهده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که از نظر RMSE ، MBE و R^2 روش فازی تخمینی بهتر از IDW داشته است که نشان از توانمندی این روش در درون‌یابی است. برای رفع مشکل کمبود داده در روش‌های کریجینگ و فازی از داده‌های کمکی کلر، سدیم و آهن استفاده شد. مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد که داده‌های کمکی استفاده‌شده در روش‌های کوکریجینگ و فازی از نظر RMSE به‌ترتیب ۴۶ و ۵۱ درصد دقت روش‌های درون‌یابی را بهبود دادند. این مقدار افزایش دقت ضمن بیان اهمیت استفاده از داده‌های کمکی، توانایی روش‌های درون‌یابی فازی را در استفاده از داده‌های کمکی نشان می‌دهد. هر چه تعداد داده‌های کمکی که همبستگی زیادی با پارامتر تخمین‌شونده دارند بیشتر باشد، نتایج روش‌های کریجینگ و فازی بهتر می‌شود [۳۰]، اما تأثیر اولین دادهٔ کمکی بیشینه است؛ زیرا در روش فازی با وارد شدن کلر به‌عنوان اولین دادهٔ کمکی، دقت نتایج ۴۹/۸ درصد بهتر شد، اما استفاده از داده‌های سدیم و آهن در ادامه تنها موجب بهبود ۱ درصدی نتایج شد. ازاین‌رو استفاده از حداقل یک دادهٔ کمکی در تخمین آرسنیک توصیه می‌شود.



شکل ۱۰. پهنه‌بندی آرسنیکی آب‌های زیرزمینی دشت خوی

علت اصلی نتیجهٔ مناسب روش فازی در این تحقیق، احتمالاً وابسته نبودن عملکرد روش فازی به نرمال بودن توزیع داده‌هاست. از طرفی روش‌های فازی روش‌هایی مناسب برای مدلسازی سیستم‌های پیچیده، مبهم و انعطاف‌پذیرترند. دیگر مزایای روش‌های فازی را می‌توان غیرخطی بودن و توانمندی آنها در استخراج رفتارهای سیستم دینامیک دانست. برتری روش فازی به کوکریجینگ این است که کوکریجینگ با تعداد کمی از داده‌ها کار می‌کند و اضافه کردن دادهٔ کمکی سرعت پردازش را به‌شدت کاهش می‌دهد. علاوه‌بر این، برخلاف روش‌های کریجینگ که در آنها باید نوع واریوگرام، تبدیل نرمال و غیره بهینه شوند در روش‌های فازی المان‌های بهینه‌شونده (تعداد دسته و نوع توابع عضویت) کمترند و در نتیجه می‌توان راحت‌تر و سریع‌تر (هم از نظر اجرای کاربر و هم به‌لحاظ نرم‌افزاری) آنها را اجرا کرد، در نتیجه کاربرپسندترند و ویژگی‌های بیان‌شده برای روش مناسب درون‌یابی از نظر هانگ را دارند [۲۸]. آنالیز حساسیت با وارد کردن تعداد دسته‌های متفاوت نیز نشان داد که روش فازی به تعداد دسته‌ها وابستگی زیادی ندارد. شکل ۱۰ پهنه‌بندی آرسنیکی آب‌های زیرزمینی دشت خوی را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل ۱۰ مشخص است، مناطق جنوب شرقی دشت خوی بیشترین آلودگی و مناطق شمال غربی بیشترین کیفیت آب‌های زیرزمینی از منظر آلودگی آرسنیکی را دارند.

نتیجه‌گیری

در ایران منابع آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی است. بررسی غلظت فلزات سنگین و به‌ویژه آرسنیک می‌تواند در مدیریت صحیح منابع آب و برقراری تناسب بین کیفیت آب و نحوهٔ استفاده از آنها تأثیر بسزایی داشته باشد. در این تحقیق روش‌های زمین‌آماری و فازی در تخمین دقیق مقدار آرسنیک آب‌های زیرزمینی دشت خوی ارزیابی شد. از جمله عوامل مؤثر بر نتایج درون‌یابی را در این دشت، نرمال نبودن داده‌ها و تراکم کم داده‌های نمونه‌برداری بود. استفاده از داده‌های کمکی در هر دو روش کوکریجینگ و فازی به‌ترتیب ۴۶ و ۵۱ درصد بهبود نتایج روش‌های درون‌یابی را در پی داشت. روش فازی با داده‌های کمکی کلر، سدیم و آهن با RMSE=۱۲/۹۲ ppb بهترین برآورد را داشت. روش فازی برخلاف روش‌های کریجینگ که فرض نرمال بودن داده‌ها ضروری است، به

نرمال بودن توزیع آرسنیک در منطقه نیاز ندارد؛ ازاین‌رو روش درون‌یابی فازی نتایج بهتری داشت. روش‌های فازی روش‌های جدیدی‌اند که دقت زیادی در درون‌یابی دارند، ولی کاربرد آنها محدود است؛ ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود این روش در مورد عناصر سنگین دیگر در مناطق مختلف اجرا و نتایج آن با روش‌های درون‌یابی دیگر مقایسه شود.

منابع

[۱]. ابراهیم‌زاده، سلمان؛ شاکری، عطا؛ بوستانی فردین، ۱۳۹۱، بررسی آلودگی ناشی از فلزات سنگین در آب زیرزمینی دشت زرقان واقع در شمال شرق شیراز، چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، ۱۰ و ۱۱ آبان، تهران، دانشگاه تهران.

[۲]. جانستون کوین، ۱۳۹۲، تحلیلگر زمین‌آماری در ArcGIS، ترجمهٔ الهام اسمعیل‌زاده و طاهره نصیرزاده ، نشر ماهواره: ۴۱۸.

[۳]. آقازاده نصرت ؛ اصغری زینب، ۱۳۹۰، ارزیابی هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت خوی، اولین همایش ملی زمین شناسی ایران.

[۴]. بدیعی‌نژاد احمد؛ فرزادکیا، مهدی؛ غلامی، میترا؛ جنیدی معفری احمد، ۱۳۹۱، بررسی کیفیت شیمیایی منابع آب شرب زیرزمینی دشت شیراز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی(GIS)، فصلنامهٔ طب جنوب، شمارهٔ ۱۵: ۶۲- ۴۵.

[۵]. بوداغی، هاجر؛ یونسیان، مسعود؛ محوی، امیرحسین؛ محمدی، محمودعلی؛ دهقانی، محمدهادی؛ نظم آرا شاهرخ، ۱۳۹۰، بررسی میزان آرسنیک، کادمیوم و سرب در خاک و آب زیرزمینی و ارتباط آن با کود شیمیایی در خاک شالیزاری، مجلهٔ دانشگاه علوم پزشکی مازندران، شمارهٔ ۲۱: ۲۸-۲۰.

[۶]. جانباز، مهدیه؛ خلقی، مجید؛ هورفر، عبدالحسین؛ حق‌شناس، داوود، ۱۳۹۱، بررسی آزمایشگاهی حذف آلایندهٔ آرسنیک توسط نانو ذرات آهن از آبزیرزمینی، اولین کنفرانس ملی نانوفناوری و کاربرد آن در کشاورزی و منابع طبیعی، شمارهٔ ۳: ۲۹-۱۵.

[۷]. جلالی، لیدا، ۱۳۹۰، بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت خوی، کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ علوم طبیعی، گروه زمین: ۲۲۷-۱.

[۸]. حسنی پاک، علی‌اصغر؛ شرف‌الدین، محمد، ۱۳۹۰، تحلیل داده‌های اکتشافی، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران: ۱۵۶-۳۴.

[۹]. رجایی، قاسم؛ مهدی‌نژاد، محمدهادی؛ حصاری مطلق، سمانه، ۱۳۹۰، بررسی کیفیت شیمیایی آب شرب روستایی دشت بیرجند و قائن در سال ۱۳۸۹-۱۳۸۸، مجلهٔ تحقیقات نظام سلامت، شمارهٔ ۷: ۷۴۵-۷۳۷.

[۱۰]. شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۳۹۱، عناوین اولویت های تحقیقاتی وزارت نیرو در سال ۱۳۹۱ - شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و شرکت های زیرمجموعه، وزارت نیرو، دفتر آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت نیرو.

[۱۱]. صاحب‌جلال، احسان؛ دهقانی، فرهاد ؛ طباطبایی‌زاده، منیرالسادات، ۱۳۹۱، (تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ (مطالعه موردی: دشت بهادران مهریز. مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شمارهٔ ۱۷: ۶۱-۵۱.

[۱۲]. عسگری، علیرضا؛ محوی، امیرحسین؛ واعضی، فروغ ؛ خلیلی فاطمه، ۱۳۸۷، کارایی حذف آرسنیک از آب آشامیدنی توسط گرانول هیدروکسید آهن (GFH)، مجلهٔ دانشگاه علوم پزشکی قم، شمارهٔ ۲: ۶۳-۵۳.

[۱۳]. فرجی سبک‌بار، حسنعلی ؛ عزیزی، قاسم، ۱۳۸۵، ارزیابی میزان دقت روش های درون یابی فضایی مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد، پژوهش‌های جغرافیای، شمارهٔ ۵۸: ۱۵-۱.

[۱۴]. کریمی گوهری، شهرام؛ خلیفه، سمیه، ۱۳۹۲، ارزیابی کارایی شبکه های آب سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته های (مطالعه موردی: حوزه بختگان- مهارلو)، پژوهشنامه مدیریت حوزهٔ آبخیز، شمارهٔ ۳: ۵۰-۳۴.

[۱۵]. محمدی، مسعود؛ محمدی قلعه‌نی، مهدی ؛

ابراهیمی کیومرث، ۱۳۹۰، تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، مجلهٔ پژوهش آب ایران، شمارهٔ ۵: ۵۲-۴۱.

[۱۶]. ندیری عطاالله؛ اصغری مقدم اصغر؛ صادقی فریبا ؛ آقایی حسین، ۱۳۹۱، بررسی آنومالی آرسنیک موجود در منابع آب سد سهند، مجلهٔ محیط‌شناسی، شمارهٔ ۳۸: ۷۴-۶۱.

[۱۷]. ندیری، عطاالله؛ اصغری مقدم، اصغر؛ عبقری، هیراد؛ فیجانی، الهام، ۱۳۹۲، توسعه مدل‌های هوش مصنوعی مرکب در برآورد قابلیت انتقال آبخوان، مطالعه موردی: دشت تسوج، مجلهٔ تحقیقات منابع آب ایران، شمارهٔ ۹: ۱۴-۱.

[۱۸]. ندیری، عطاالله؛ اصغری مقدم، اصغر؛ عبقری هیراد، کلانتری اسکویی، علی؛ حسین‌پور، عبدالله، ۱۳۹۳، مدل منطق فازی در تخمین قابلیت انتقال آبخوان‌ها مطالعه موردی: دشت تسوج، مجلهٔ دانش آب و خاک، شمارهٔ ۲۴: ۲۳۳-۲۱۹.

[19]. Amini, M and Afyuni, M, Fathianpour, N, Khademi, H, Flühler, H, 2005, Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation, Geoderma, .vol124, pp.223-233.

[20]. Asadi, S and Hassan, M, Nadiri, A, Dylla, H, 2014, Artificial intelligence modeling to evaluate field performance of photocatalytic asphalt pavement for ambient air purification, Environmental Science and Pollution Research, .vol21, pp.1-11.

[21]. Bhattacharjee, S and Chakravarty, S, Maity, S, Dureja, V, Gupta, KK, 2005, Metal contents in the groundwater of Sahebgunj district, Jharkhand, India, with special reference to arsenic, Chemosphere, .vol58, pp.1203-1217.

[22]. Cetinkaya, CP and Harmancioglu, NB, 2014, Reduction of streamflow monitoring networks by a reference point approach, Journal of Hydrology, .vol512, pp.263-273.

[23]. Dummer, TJ and Yu, ZM, Nauta, L, Murimboh, JD, Parker, L, 2014, Geostatistical modelling of arsenic in drinking water wells and related toenail arsenic concentrations across Nova Scotia, Canada, Science of The Total Environment.

[24]. Gong, G and Mattevada, S, O'Bryant, SE, 2014, Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas, Environmental Research, .vol130, pp.59-69.

[25]. Kalhor, A and Araabi, BN, Lucas, C, 2013, Evolving Takagi–Sugeno fuzzy model based on switching to neighboring models, Applied Soft Computing, .vol13, pp.939-946.

[26]. Ke, W and Cheng, HP, Yan, D, Lin, C, 2011, The Application of Cluster Analysis and Inverse Distance-Weighted Interpolation to Appraising the Water Quality of Three Forks Lake, Procedia Environmental Sciences, .vol10, pp.2511-2517.

[27]. Lado, LR and Polya, D, Winkel, L, Berg, M, Hegan, A, 2008, Modelling arsenic hazard in Cambodia: A geostatistical approach using ancillary data, Applied Geochemistry, .vol23, pp.3010-3018.

[28]. Li, J and Heap, AD, 2014, Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review, Environmental Modelling & Software, .vol53, pp.173-189.

[29]. Li, J and Heap, AD, 2011, A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors, Ecological Informatics, .vol6, pp.228-241.

[30]. Li, J and Heap, AD, 2008, A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists, Department of Resources, Energy and Tourism, .vol6, pp.1-154.

[31]. Liu, CW and Jang, CS, Liao, CM, 2004, Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan), Science of the Total Environment, .vol321, pp.173-188.

[32]. Ma, S.-q. and Chen, F, Wang, Q, Zhao, Z, 2012, Sugeno Type Fuzzy Complex-Value Integral and Its Application in Classification, Procedia Engineering, .vol29, pp.4140-4151.

[33]. Nadiri, A and Chitsazan, N, Tsai, F, Moghaddam, A, 2013a, Bayesian Artificial Intelligence Model Averaging for Hydraulic Conductivity Estimation, Journal of Hydrology, .vol19, pp.520–532.

[34]. Nadiri, AA and Fijani, E, Tsai, FT, Moghaddam, AA, 2013b, Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration, Journal of Hydroinformatics, .vol15, pp.1474-1485.

[35]. Price, DT and McKenney, DW, Nalder, IA, Hutchinson, MF, Kesteven, JL, 2000, A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data, Agricultural and Forest Meteorology, .vol101, pp.81-94.

[36]. Tutmez, B and Hatipoglu, Z, 2010, Comparing two data driven interpolation methods for modeling nitrate distribution in aquifer, Ecological Informatics, .vol5, pp.311-315.

[37]. Tayfur, G and Nadiri, AA, Moghaddam, AA, 2014, Supervised Intelligent Committee Machine Method for Hydraulic Conductivity Estimation, Water Resources Management, .vol28, pp.1173-1184.

[38]. Xie, Y and Chen, T, Lei, M, Yang, J, Guo, Q, Song, B, Zhou, X, 2011, Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis, Chemosphere, .vol82, pp.468-476.