

تحلیل مکانی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی دشت همدان-بهار

حمید زارع ایبانه^۱ - دانشیار آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۲۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۴/۹

چکیده

این مطالعه با هدف مدل‌سازی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با روش‌های زمین‌آماري انجام شد. پارامترهای هدایت الکتریکی املاح محلول (EC)، pH، قلیائیت (SAR) و باقی‌مانده جامد املاح (TDS) از خصوصیات اصلی آب زیرزمینی انتخاب شدند. مدل‌سازی با استفاده از روش کریجینگ، روش معکوس فاصله وزنی و روش شبکه توابع پایه‌شعاعی انجام شد. برای انتخاب روش مدل‌سازی، دو آماره میانگین مجذور مربعات خطای نرمال (NRMSE) و میانگین خطای سوگیری (MBE) در قالب تکنیک اعتبارسنجی متقابل به کار گرفته شد. نتایج نشان داد روش کریجینگ با نیم-تغییرنمای کروی در مدل‌سازی عوامل کیفی برتری دارد. مقدار NRMSE در نیم‌تغییرنمای کروی برای هر چهار عامل بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۶ بود که نسبت به سایر نیم‌تغییرنماها (۰/۹۶ تا ۰/۹۸) کمتر بود. کمترین خطای مدل‌سازی به پارامتر pH و بیشترین خطا معادل $NRMSE=0/42$ و $MBE=-0/01$ به پارامتر EC تعلق داشت. بر همین اساس پهنه‌بندی‌ها به منظور درون‌یابی عوامل کیفی در سطح آبخوان و برون‌یابی عوامل کیفی بر اساس اطلاعات آبخوان در سطح دشت صورت گرفت. پهنه‌بندی تغییرات مکانی نشان داد مقادیر EC و TDS دارای روند تغییراتی مشابه است. یکی از دلایل اصلی تشابه تغییرات EC با TDS ارتباط خطی این دو پارامتر است. نتایج پهنه‌بندی نشان داد مقادیر EC، TDS و SAR، از امتداد جنوب‌شرق به شمال‌شرق کاهش یافته‌است؛ به طوری که مقادیر SAR از بازه ۱/۹-۲/۸ به ۱/۲-۰/۸، EC از بازه ۲۳۹۵/۳-۱۲۶۶/۴ به بازه ۸۲۳/۵-۴۸۳/۳ میکروموس بر سانتی‌متر و TDS از بازه ۱۵۹۱/۳-۸۲۶/۳ به بازه ۵۲۶/۲-۲۹۵/۷ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. تغییرات پارامتر pH غیریکنواخت‌تر از سه پارامتر دیگر بوده و حداکثر آن در ناحیه شمال‌غربی دشت در بازه ۷/۹۳ تا ۷/۷۵ است. هم‌چنین نتایج حاصل بیان‌گر دقت کمتر روش زمین‌آمار در برآورد پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در نقاط حداکثر بود. در مجموع می‌توان اظهار داشت با داشتن مقادیر یک کمیت کیفی آب در یک نقطه می‌توان مقدار همان کمیت را در نقطه‌ای دیگر با مختصات معلوم با دقت بالا برآورد نمود.

کلید واژه‌ها: کیفیت آب زیرزمینی، کریجینگ، نیم‌تغییرنما، دشت همدان-بهار.

۱. مقدمه

موضوعی که در اکثر مطالعات منابع آب‌های زیرزمینی به آن توجه می‌شود تخمین کیفیت زمانی و مکانی آب در یک منطقه و نحوه تغییرات آن است. آب‌های زیرزمینی، بخش مهمی از اکوسیستم قابل تجدید منابع آب بوده که مدیریت نامناسب استحصال، منجر به تغییر کیفیت این‌گونه منابع و تخریب مستقیم یا غیرمستقیم سایر منابع می‌گردد (زهتابیان و همکاران، ۱۳۸۹: ۶۱). توسعه ناپایدار جوامع انسانی، امروزه یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی است که مستلزم حفظ کیفیت آب‌های زیرزمینی و مطالعه مداوم تغییرات کیفی از راه نمونه‌برداری مستمر می‌باشد. لذا تبیین وضع موجود و ارائه الگو و مدلی مناسب در راستای اهداف توسعه همه‌جانبه و پایدار مهم و ارزشمند است. بیشتر روش‌های به‌کار رفته در تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی به‌صورت روش‌های گرافیکی، حاصل تجزیه نمونه‌های آب و روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک بوده که با محدودیت تعداد نمونه و عدم لحاظ همبستگی مکانی نمونه‌ها با عوامل کیفی همراه است. پیشرفت‌های اخیر در معرفی و بسط روش‌های غیرکلاسیک باعث افزایش تمایل استفاده از زمین‌آمار^۱ به‌منظور بررسی مکانی در شناخت بیشتر کیفیت منابع آب زیرزمینی شده است (رضایی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۳۲). زمین‌آمار فرآیندی محاسباتی است که در آن مقدار یک کمیت در یک نقطه معلوم، براساس وزن اختصاصی به نقاط دارای اطلاعات معلوم مجاور برآورد می‌گردد. کیفیت آب‌های زیرزمینی دارای تغییرات مکانی و زمانی بوده و تکنیک زمین-آمار، به‌دلیل در نظر گرفتن همبستگی مکانی داده‌ها و بیان آن‌ها در قالب مدل‌های ریاضی اهمیت زیادی دارد (سان و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۱۶۳). گزارش‌های محققین حاکی از کاربرد زمین‌آمار در حل پیچیدگی‌های مربوط به فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی، افزایش دقت تخمین‌ها و کاهش تعداد نمونه‌برداری‌ها از دیدگاه اقتصادی است (زهتابیان و همکاران، ۱۳۸۹: ۶۱؛ قره محمودلو و همکاران، ۱۳۸۷: ۱). در اکثر پژوهش‌ها روش کریجینگ^۲ جهت برآورد کیفیت آب زیرزمینی در برآورد تغییرات مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی معرفی شده است (احمد، ۲۰۰۲: ۱۵۶۴). سان و همکاران (۲۰۰۹: ۱۱۶۳) با بررسی دقت سه روش توابع پایه شعاعی^۳ (RBF)، معکوس فاصله وزنی^۴ (IDW) و کریجینگ نشان دادند برآوردهای روش کریجینگ در میان‌یابی عمق آب زیرزمینی کویر مین‌کین در شمال چین از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج ارزیابی‌های صورت گرفته در پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی آبخوان حوضه آنتمون‌تاس^۵ در شمال یونان از سوی تئودوسیو و لاتینوپولوس (۲۰۰۶: ۹۹۱) حاکی از برتری روش زمین‌آمار کریجینگ به‌واسطه ضریب تغییرات کمتر این روش نسبت به سایر روش‌ها بود. برتری روش کریجینگ ساده در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی کشور هلند در مطالعه فینک و همکاران (۲۰۰۴: ۲۳) گزارش شد. تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی

1 Spatial Statistics

2 Kriging

3 Radial basis function

4 Inverse distance weighting

5 Anthemountas

شوری و عمق آب زیرزمینی استان مازندران برای فصل بهار نشان داد روش کریجینگ نسبت به روش‌های معکوس فاصله وزنی و کوکریجینگ ارجحیت دارد (دلبری و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۵۹). گاوس و همکاران (۲۰۰۳: ۹۳۹) از روش کریجینگ گسسته برای برآورد غلظت آرسنیک و تهیه نقشه ریسک خطر آب‌های زیرزمینی بنگلادش استفاده نمودند. نتایج مطالعه نظری‌زاده و همکاران (۱۳۸۵: ۱) در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بالارود استان خراسان مویده عملکرد مناسب مدل کروی جهت برازش و ریوگرام تجربی بر متغیرهای شوری، کلر و سولفات بود. مطالعات کریسیک (۱۹۹۷: ۱۰۴۴) برای درون‌یابی و تهیه منحنی‌های تراز آب‌های زیرزمینی نشان داد روش کریجینگ و نتایج حاصل از آن به دلیل لحاظ واریانس مکانی، موقعیت و توزیع نمونه‌ها قابل اعتماد است. مطالعه تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی دشت چمچمال در غرب ایران بیان‌گر نقش نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای در انتخاب روش مناسب زمین‌آمار است (صفری، ۱۳۸۱). در کاربردی دیگر از روش کریجینگ برای تخمین متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی توسط احمد (۲۰۰۲: ۱۵۶۴) نیز این روش توصیه شد. مطالعه زهتابیان و همکاران (۱۳۸۹: ۶۱) با هدف مدل‌سازی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی با روش‌های زمین‌آمار حاکمی از برتری قابل ملاحظه روش زمین‌آمار کوکریجینگ نسبت به روش‌های معین نظیر روش تابع پایه شعاعی و روش معکوس فاصله وزنی دارد. کراوچنکو (۲۰۰۳: ۱۵۶۴) عدم ارائه واریانس خطا و لو و همکاران (۲۰۰۸: ۱۰۴۴) عدم توجه به پراکنش و توزیع مکانی نقاط اندازه‌گیری و ثابت بودن پارامتر توان برای کل سطح مورد پهنه‌بندی را از جمله عوامل کاهش دقت روش معکوس فاصله وزنی در مقایسه با روش کریجینگ گزارش نموده‌اند. مقامی و همکاران (۱۳۹۰: ۱۷۱) برای پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی شهرستان آباد از روش‌های گوناگون میان‌یابی کریجینگ، اسپیلاین و معکوس فاصله وزنی استفاده نمودند. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد روش کریجینگ با نیم‌تغییرنمای نمایی و دایره‌ای در میان‌یابی و پهنه‌بندی کیفیت آب شرب نسبت به روش‌های دیگر مناسب است. پیش‌بینی مکانی غلظت فلورید در منابع آب زیرزمینی دو دشت بازرگان و پلدشت در شمال‌غرب ایران نشان داد دقت روش کریجینگ با ضریب تعیین $0/۸۳$ کمتر از روش کوکریجینگ با ضریب تعیین $0/۸۶$ بود (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۷: ۱).

بررسی داده‌ها و یافته‌های موجود گویای استفاده بی‌رویه انسان از کودهای شیمیایی و فزاینده‌گی دامنه تخریب کیفیت منابع آبی است. تداوم چنین وضعیتی نه تنها موجب توسعه پایدار محیطی نمی‌گردد، بلکه سبب به هم خوردن گسترده نظام‌های محیطی و عدم تعادل‌های وسیع در محیط می‌گردد. به همین دلیل توسعه ناپایدار جوامع انسانی، در زمینه بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی به موازات استفاده بدون برنامه از کودهای شیمیایی یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی در تمامی سطوح جامعه است. مخاطرات شیمیایی یکی از مخاطرات مهم محیطی است که در زمینه مسایل کیفی منابع آب و سایر زمینه‌ها سلامت و امنیت گستره زیست و اسکان بشر را با خطر مواجه می‌سازد. بررسی منابع نشان داد که در بررسی مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی، باید وابستگی مکانی نقاط مشاهداتی و تاثیر آن‌ها بر کمیت‌های نقاط مجاور لحاظ گردد. وابستگی کیفی هر نقطه از آبخوان را می‌توان با خصوصیات مشابه نقاط مجاور و وزن موثر آن‌ها به-

کمک روش‌های مختلف زمین‌آماری پیش‌بینی نمود. در این راستا اقدام به مطالعه میان‌یابی عوامل کیفی آبخوان دشت همدان - بهار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آبخوان‌های استان همدان و تامین‌کننده بیش از ۸۰ درصد از منابع آبی مورد نیاز کشاورزی، شرب و صنایع کوچک پراکنده در سطح دشت شد. هدف از این مطالعه منطقه‌ای نمودن خصوصیات کیفی منابع آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه می‌باشد که در تحلیل مکانی پارامترهای کیفی منطقه نقش بسزایی دارد.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت همدان-بهار موسوم به سیمینه‌رود با وسعت ۲۴۵۹ کیلومتر مربع بین طول شرقی ۱۷°، ۴۸° تا ۳۳°، ۴۸° و عرض شمالی ۴۹°، ۳۴° تا ۰۲°، ۳۵° در دامنه شمالی ارتفاعات الوند قرار دارد. وسعت دشت ۸۸۰ کیلومتر مربع و گسترش آبخوان اصلی ۴۶۸ کیلومتر مربع است. حوضه از معبر باریکی در ناحیه شمالی با دشت‌های کبودرآهنگ و قهاوند ارتباط هیدروژئولوژیک دارد. وضعیت منابع آب دشت به‌مقدار زیادی به ریزش‌های برفی - بارانی و آبراهه‌های انشعاب یافته از دامنه الوند کوه وابسته است. نبود منابع آب‌های سطحی کافی، کمبود بارندگی و عدم تناسب زمانی بارش‌ها موجب فشار بیش از حد بر منابع آب زیرزمینی برای تامین بیش از ۸۰ درصد آب کشاورزی، ۵۰ درصد آب شرب شهری و بیلان منفی آبخوان فوق شده است (بلالی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۹۴). از طرف دیگر استفاده بی‌رویه و نامناسب از کودهای شیمیایی برای افزایش کمیت محصولات کشاورزی می‌تواند موجب تغییرات کیفی منابع آب زیرزمینی شود. در این پژوهش برای تحلیل الگوی مکانی عوامل کیفی آب زیرزمینی، از روش نمونه‌برداری طبقه-بندی شده^۱ استفاده گردید که در مناطق دارای وسعت زیاد و موانع جغرافیایی نامنظم کاربرد دارد. نمونه‌برداری‌ها به‌شکل لحظه‌ای و پس از حدود ۱۰ دقیقه پمپاژ، در ظروف عاری از آلودگی انجام و تجزیه شیمیایی آن‌ها به‌روش‌های استاندارد، توسط آزمایشگاه کیفیت اداره آب منطقه‌ای استان همدان صورت گرفت (سبزی‌علی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹: ۶۳). به‌منظور پهنه‌بندی وضعیت کیفی آبخوان، از اطلاعات چهار مرحله نمونه‌برداری ۲۵ حلقه چاه مشاهداتی طی دو فصل بهار و تابستان سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹، استفاده گردید. اهمیت فصل بهار به‌عنوان فصل پرآب در برداشت حداکثر، به‌منظور انجام آبیاری محصولات کشاورزی و سایر امور به‌موازات بارش‌های بهاره و اهمیت فصل تابستان به‌عنوان فصل کم آب در برداشت حداکثر، برای تامین آب شرب شهرهای همدان و بهار می‌باشد. ضمن آن‌که اندازه‌گیری‌ها اساساً در این دو فصل انجام می‌گیرد (دانشور و ثوقی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۶۵). تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه کیفیت اداره آب برای تعیین عوامل هدایت الکتریکی املاح محلول^۲ (EC) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، pH، قلیائیت^۳ (SAR) و باقی‌مانده جامد املاح^۴ (TDS) مورد تجزیه هیدروشیمیایی قرار گرفتند. انتخاب پارامترهای فوق به‌جهت

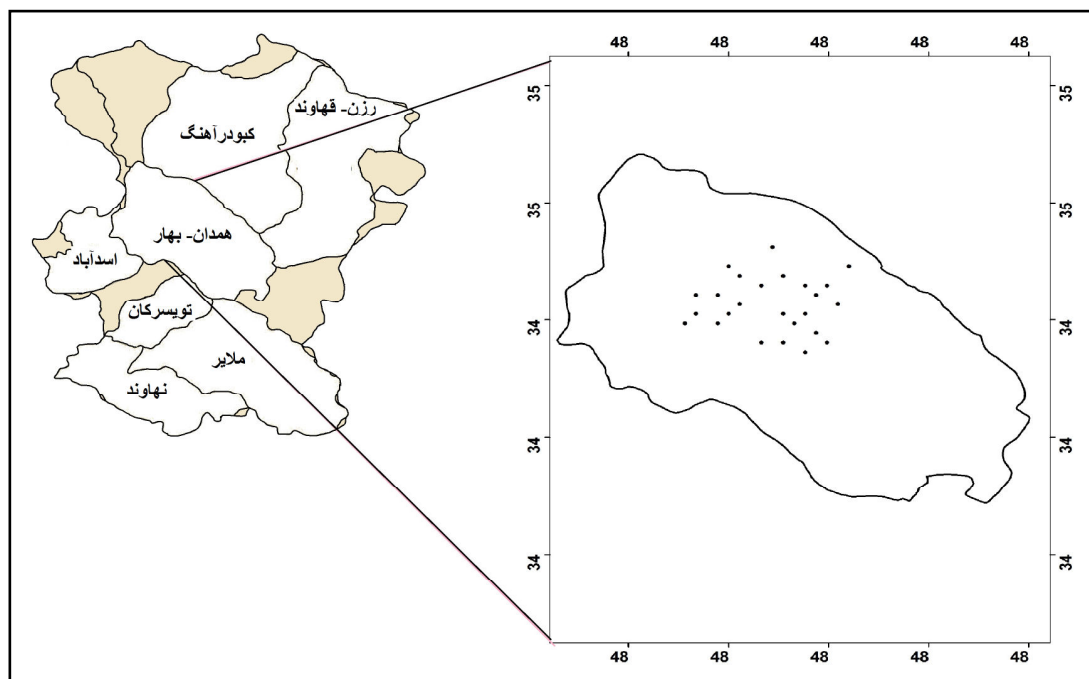
1 Stratified Random Sampling

2 Electrical conductivity

3 Sodium absorption ratio

4 Total dissolved solid

اهمیت شناخت کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر مصارف شرب انسانی، دامی، کشاورزی، صنعتی، تعیین جوامع آبی و جانوری و گیاهی است (رضایی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۳۲؛ سلاجقه و همکاران، ۱۳۹۰: ۸۶). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و پراکنش چاه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS نشان داده شده است. در این شکل موقعیت دشت و محل‌های نمونه‌برداری در محدوده اصلی آبخوان آمده است. لازم به ذکر است که محل‌های نمونه‌برداری مربوط به ۲۵ حلقه چاه مشاهداتی در آبخوان دشت می‌باشد که با احتساب دو فصل از دو سال نمونه‌برداری از ۱۰۰ داده کیفی برای پهنه‌بندی هر یک از چهار عامل EC، pH، SAR و TDS استفاده شد.



شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط اندازه‌گیری

۳. مواد و روش‌ها

برای انجام تحلیل مکانی عوامل کیفی ابتدا کنترل کیفیت داده‌ها، از نظر نرمال بودن و همگن بودن با آزمون کلموگروف اسمیرونوف در محیط نرم‌افزار SPSS انجام شد. نمودار نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ترسیم و شناسایی داده‌های خارج از دامنه $x \pm 3sd$ (میانگین متغیر، sd انحراف معیار) با نمودار جعبه‌ای^۱ صورت گرفت. داده‌های خارج از دامنه به‌عنوان مقادیر غیرعادی می‌باشند که وجود چنین داده‌هایی می‌تواند موجب گسستگی داده‌ها و نقص تئوری زمین‌آمار شود (خداکرمی و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۴۳). آن دسته از داده‌هایی که از توزیع فراوانی نرمال تبعیت نداشتند با استفاده از ریشه دوم نرمال شدند و برای میان‌یابی مقادیر کمی داده‌ها در نقاط فاقد اندازه‌گیری از سه روش زمین‌آماری

1 Box and Whisker Plot

کریجینگ معمولی^۱ (OK)، معکوس فاصله وزنی^۲ (IDW) و شبکه توابع پایه شعاعی^۳ (RBF) بهره گرفته شد. معادله کلی روش های زمین آماری برای میان یابی مقادیر کمی عوامل کیفی در نقاط مجهول، به شکل معادله ۱ است که نحوه برآورد فاکتور وزنی موجب تفاوت در دقت نتایج حاصل از آن ها می باشد (طباطبائی و غزالی، ۱۳۹۰: ۲۲).

$$Z^*(xi) = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (1)$$

وزن نقاط نمونه برداری شده w_i مقدار نمونه برداری شده متغیر $z(x_i)$ مقدار برآورد شده متغیر $Z^*(xi)$ که در آن تعداد کل نقاط n شماره نقاط نمونه برداری و شامل وزن بیشتر برای نقاط نزدیک تر و وزن کمتر برای نقاط دورتر، نمونه برداری است.

کریجینگ معمولی یکی از روش های مناسب برای تحلیل فضایی و توزیع مکانی داده ها است. این روش بهترین تخمین گر خطی نااریب^۴ (BLUE) از n داده اندازه گیری شده است که با محاسبه وزن داده ها (w_i) ، مقادیر متغیر مجهول در نقاط ناشناخته برآورد می گردد (دلبری و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۵۹). تحلیل ساختار مکانی بین داده ها براساس حل معادله نیم تغییرنا (رابطه ۲) به عنوان اصلی ترین ابزار زمین آمار است که به کمک آن ضرایب وزنی مورد نیاز در رابطه ۱ به دست می آید (اسچانینگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۶۳۱).

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

پارامترهای آن شامل $\gamma(h)$ نیم تغییرنمای تجربی، $n(h)$ تعداد زوج نمونه ها به فاصله برداری h از یکدیگر، $Z(x_i)$ و $Z(x_{i+h})$ به ترتیب مقادیر نمونه برداری در نقاط x و $x+h$ است. در این مطالعه با برازش سه مدل نیم تغییرنمای دایره ای^۵، کروی^۶ و گوسین^۷ بر داده ها، بهترین مدل نیم تغییرنما براساس کمترین مقدار آماره جذر میانگین مجموع مربعات خطای استاندارد^۸ (RMSSE)، برای مدل سازی نهایی به دست آمد. سپس پارامترهای اثر قطعه ای^۹ (C_0) ، سقف^{۱۰} (C_0+C) ، شعاع تاثیر^{۱۱} (A) و آستانه^{۱۲} $(\frac{C}{C+C_0})$ از مدل نیم تغییرنمای پیشنهادی محاسبه و برای انجام درونیابی ها و تحلیل ها مورد استفاده قرار گرفت.

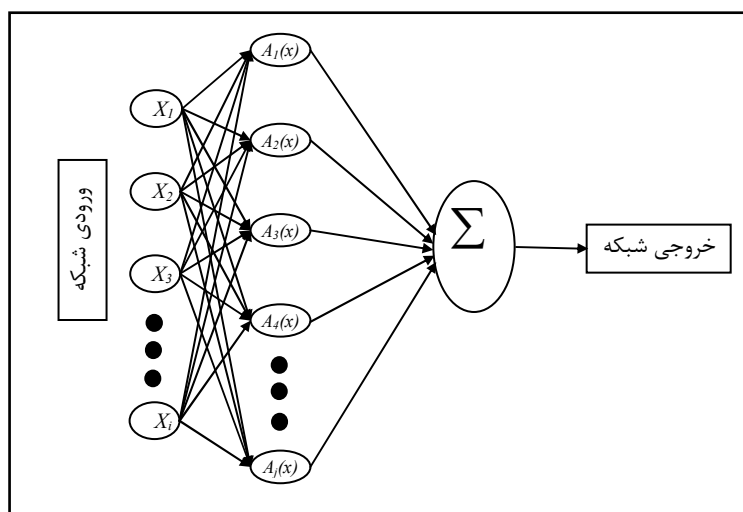
-
- 1 Ordinary kriging
 - 2 Inverse Distance Weight
 - 3 Radial basis function
 - 4 Best linear unbiased estimator
 - 5 circular
 - 6 Spherical
 - 7 Gaussian
 - 8 Root Mean Square Standard Error
 - 9 Nugget effect
 - 10 Sill
 - 11 Range of influence
 - 12 Proportion

در روش معکوس فاصله وزنی نیز مشابه روش کریجینگ وزن نقاط نمونه برداری، به ازای توان‌های ۲، ۳ و ۴ از رابطه ۳ محاسبه و با اعمال آن در رابطه ۱، مقادیر هر یک از عوامل کیفی EC، pH، SAR و TDS به تفکیک به دست آمد (لو و وانگ، ۲۰۰۸: ۱۰۴۴). فرض اساسی در این روش شباهت بیشتر نقاط نزدیک‌تر به نقطه برآورد و اختصاص وزن بیشتر به آن‌هاست.

$$w_i = d_i^{-m} \sum_{i=1}^n d_i^{-m} \quad (3)$$

در آن d_i فاصله اقلیدوسی n امین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین، m توان وزندهی فاصله و n تعداد نقاط مجاور است.

روش سوم مورد استفاده، شبکه‌های توابع پایه شعاعی بود که نوعی شبکه عصبی مصنوعی دارای پایه ریاضیاتی بسیار قوی بر مبنای فرضیه منظم‌سازی برای حل مسائل مشکل می‌باشد. به‌طور کلی این شبکه‌ها متشکل از سه لایه، شامل یک لایه ورودی، یک لایه مخفی یا میانی و یک لایه خروجی با ساختاری رو به جلو هستند که توانایی نگاشت-های غیرخطی بین نرون‌های ورودی و نرون‌های خروجی را دارند (شکل ۲). در این روش از داده‌های سال اول برای آموزش شبکه استفاده شد و داده‌های سال دوم به آزمون شبکه طراحی شده اختصاص یافت.



شکل ۲ شماتیک کلی ساختار توابع پایه شعاعی مورد استفاده

هر نرون لایه میانی دارای n تابع غیرخطی به تعداد نرون‌های لایه اول و خروجی شبکه، تابعی خطی از خروجی نرون‌های لایه میانی است. در این روش نیز، شبکه با تنظیمات درون‌شبکه‌ای و یافتن مقادیر بهینه وزن بین نرون‌ها، مقادیر متغیر مجهول در نقاط فاقد اندازه‌گیری را برآورد می‌نماید. معادله کلی شبکه توابع پایه شعاعی به صورت رابطه ۴ است.

$$z^*(xi) = \sum_{j=1}^n W_{kj} A_j \quad (۴)$$

که در آن W_{kj} وزن بین نرون j ام از لایه میانی و نرون k ام از لایه خروجی، A_j تابع غیرخطی خروجی نرون j ام لایه میانی است.

برای انتخاب روش میان‌یابی مناسب از روش اعتبارسنجی متقاطع^۱ براساس مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف به‌عنوان مقادیر شاهد با مقادیر برآوردی استفاده شد. در این روش در هر بار براساس $n-1$ عدد داده برداشت شده و مقادیر شبیه‌سازی شده، برای هر یک از عوامل کیفی یک معادله رگرسیونی به داده‌ها برازش یافت. این عمل به اندازه n بار برای هر چهار عامل کیفی تکرار گردید (گلاادی و کوالسکی، ۱۹۸۶: ۴). به عبارت دیگر در این روش، در هر مرحله اطلاعات یک نقطه اندازه‌گیری حذف و با استفاده از اطلاعات سایر نقاط اندازه‌گیری و اعمال روش میان‌یابی، مقدار آن نقطه برآورد می‌شود. سپس نقطه حذفی به محل خود برگشت داده شده و مقدار کمی نقطه دیگر حذف شد. با تکرار این عمل برای کلیه نقاط نمونه‌برداری و داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده، میزان خطا و انحراف مربوط به هر روش به‌دست آمد. در نهایت نتایج حاصل با معیارهای نرمال میانگین مجذور مربعات خطا^۲ (NRMSE) و میانگین خطای سوگیری^۳ (MBE) در قالب روابط ۵ و ۶ مورد سنجش قرار گرفت (زارع ایبانه و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۳۵).

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}}{\bar{Y}} \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (۶)$$

در این روابط، X_i و Y_i به ترتیب i امین داده برآوردی و اندازه‌گیری، \bar{Y} متوسط داده Y_i ، و n تعداد نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

از آنجایی که مقادیر RMSE بر حسب واحد عوامل کیفی مورد مطالعه می‌باشد لذا در آماره RMSE دقت نتایج با تقسیم به مقدار متوسط هر یک از عوامل کیفی^۴ (NRMSE) در طول دوره اندازه‌گیری، استاندارد و تحلیل شدند. هر قدر معیار NRMSE کمتر و نزدیک به صفر باشد، اختلاف مقادیر برآوردی با اندازه‌گیری کمتر است. مثبت بودن آماره MBE نشان‌دهنده بیش برآورد^۵ و منفی بودن آن به مفهوم کم برآورد^۶ متغیر مجهول است.

1 Cross Validation

2 Root Mean Square Error

3 Mean bias error

4 Normal Root Mean Square Error

5 Over estimate

6 Under estimate

در انتها پس از انتخاب روش مناسب میان‌یابی، نقشه‌های پهنه‌بندی از پارامترهای مورد بررسی تهیه گردید. بسته نرم-افزاری ArcGIS در این تحقیق به‌عنوان محیط مناسب جهت پهنه‌بندی عوامل کیفی در آبخوان دشت همدان- بهار انتخاب شد. هدف از پهنه‌بندی، منطقه‌ای نمودن خصوصیات نقطه‌ای پارامترهای مورد بررسی است. نقشه‌های پهنه‌بندی در کاهش هزینه‌های اندازه‌گیری در نقاط فاقد اندازه‌گیری کارساز هستند. مدیریت این نرم‌افزار از طریق یک پوشه اطلاعاتی شامل مقادیر داده‌های کیفی، مختصات جغرافیایی نقاط برحسب سیستم جهانی تصویر مرکاتور (UTM) می‌باشد. نرم‌افزار ArcGIS مقادیر محاسبه شده از عوامل کیفی را بر روی نقشه‌های توپوگرافی منتقل و با ایجاد بازه‌های مختلفی از مقادیر عوامل مورد مطالعه، امکان تحلیل‌های توصیفی و غیرتوصیفی را فراهم می‌سازد. ایجاد نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از امکانات نرم‌افزار فوق و ترکیب رنگ‌های مختلف نمایش بازه‌ها در ۴ سطح بین مقادیر حداقل تا حداکثر هر یک از پارامترهای کیفی انجام گرفت. در مجموع چهار نقشه پهنه‌بندی از عوامل هدایت الکتریکی املاح محلول (EC)، پ‌هاس (pH)، قلیائیت (SAR) و باقی مانده جامد املاح (TDS) ایجاد شد. حدود پهنه‌های هر نقشه نیز با در نظر گرفتن حداقل خطا صورت گرفت. هم‌چنین متناظر با هر نقشه، نمایش ستونی از مقادیر میان‌یابی و اندازه‌گیری در محل چاه‌های نمونه‌برداری، به‌همراه معادله خط برازش یافته به مقادیر این دو سری اعداد نیز آورده شد. معادله حاصل در قالب مدل رگرسیون خطی با عرض از مبدا بود.

۴. بحث و نتایج

خلاصه آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دو فصل بهار و تابستان طی سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ آبخوان همدان- بهار در جدول ۱ آورده شده است. پارامترهای توصیفی شامل مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی عوامل کیفی در نرم‌افزار SPSS محاسبه شده است. از آنجایی که برخی عوامل دارای توزیع غیرنرمال بودند، آماره‌های توصیفی عوامل نرمال‌سازی شده نیز آورده شده است.

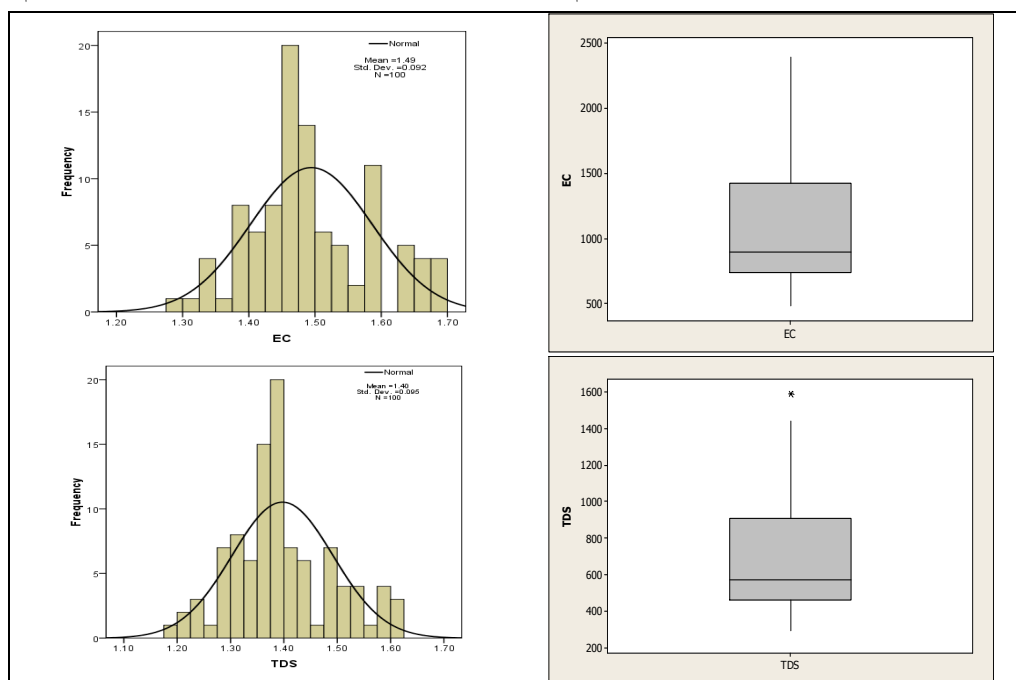
جدول ۱ خلاصه آماری ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی آبخوان همدان-بهار

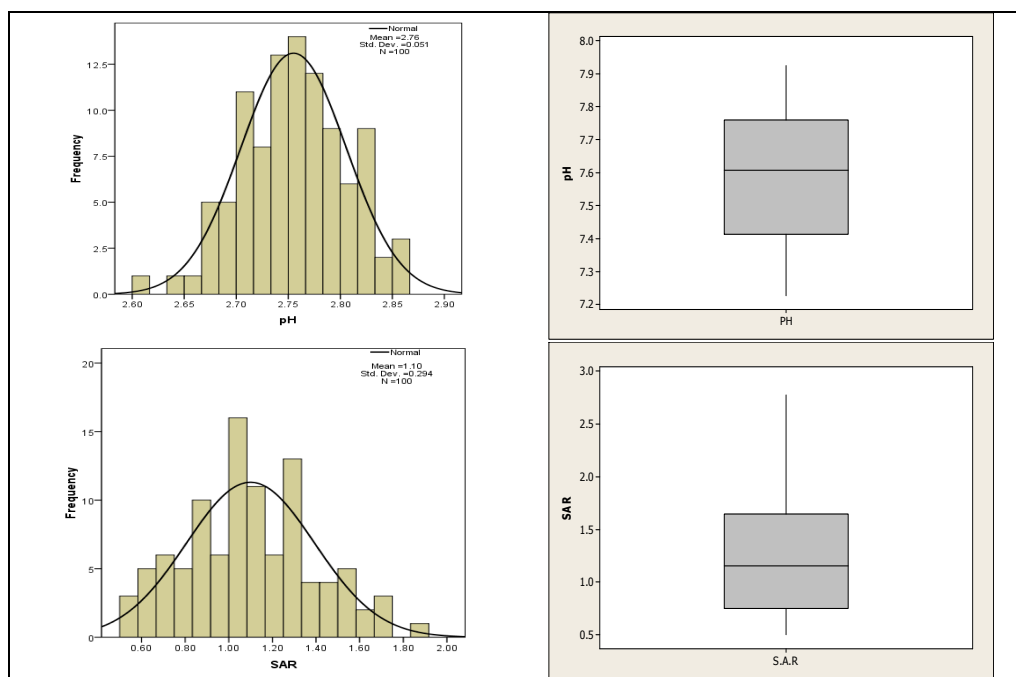
متغیر	واحد	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
EC	میکروموس بر سانتی‌متر	۲۳۵۴	۴۳۹	۱۰۷۲	۵۱۴/۷	۰/۴۸	۱/۲۷	۱/۰۴
		۵۰/۰۱	۱۹/۷	۳۱/۹۴	۰/۷۰۷	۰/۰۲	۰/۸۴	۰/۰۷۵
TDS	میلی‌گرم بر لیتر	۱۵۷۱/۲	۲۸۱	۷۰۳/۱	۳۴۹/۷	۰/۵۰	۱/۳۵	۱/۲
		۴۰/۲۷	۱۵/۷۶	۲۵/۵۸	۰/۵۸۶	۰/۰۲	۰/۹۰	۰/۲۵
pH	---	۸/۱	۷/۲۳	۷/۶۱	۰/۲۵	۰/۰۳	-۰/۱	۰/۷
SAR	---	۳/۱۱	۰/۳۴	۱/۳۸	۰/۷۶	۰/۵۵	۰/۸۹	۰/۵
		۱/۸۵	۰/۵۲	۱/۰۹	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۵	-۰/۳۷

همان‌گونه که از جدول ۱ ملاحظه می‌گردد داده‌های دارای چولگی بالا، غیرنرمال تشخیص داده شد و با استفاده از ریشه دوم نرمال‌سازی شدند. تمامی داده‌ها به‌جز داده‌های مربوط به pH نرمال‌سازی شدند که در نتیجه آن مقدار چولگی کاهش یافت. ضریب تغییرات، آماره‌ای بدون بعد است که تغییرات پارامترهای کیفی مورد مطالعه را نشان می‌دهد و براین اساس کمترین ضریب تغییرات معادل سه درصد به‌داده‌های غیرنرمال pH و بیشترین ضریب تغییرات معادل ۵۵ درصد به‌داده‌های غیرنرمال SAR تعلق دارد. بدین ترتیب می‌توان مطابق نظر مک‌برانتی و پرینگل (۱۹۹۷: ۳) متغیرهای EC، TDS و SAR را به‌دلیل آن‌که ضریب تغییراتشان بیش از ۳۵ درصد است در دسته عوامل با تغییرات زیاد قرار داد. کم بودن ضریب تغییرات نشانه عدم تاثیر عوامل موضعی مانند عوامل مدیریتی از جمله وضعیت آب-شویی، تفاوت در مقدار، نوع و زمان کوددهی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی بر تغییرات عوامل کیفی است. از آنجایی‌که استفاده از کودهای دامی و شیمیایی برای افزایش عملکرد محصولات کشاورزی و استفاده از سموم کشاورزی برای مبارزه با آفات و امراض به‌ویژه برای کشت‌های سیب‌زمینی، سیر و یونجه مرسوم است، لذا به‌نظر می‌رسد بالا بودن ضریب تغییرات عوامل کیفی، بیشتر متأثر از عوامل مدیریتی باشد. تاثیرگذاری عوامل فوق بر مقادیر کمی عوامل کیفی در گزارشات قره‌محمودلو و همکاران (۱۳۸۷: ۱) و شکوری‌کنیگری و همکاران (۱۳۹۰: ۱۰۹) آمده است.

برای دست‌یابی به اطلاعات دقیق‌تری از تغییرات عوامل کیفی نمودار توزیع فراوانی داده‌های نرمال شده و نمودار جعبه‌ای (باکس ویسکر) داده‌های غیرنرمال از هر چهار متغیر کیفی مورد مطالعه در آب زیرزمینی دشت همدان-بهار در شکل ۳ آورده شده است.

براساس داده‌های نرمال نشده (داده‌های خام) براساس داده‌های نرمال شده (با استفاده از ریشه دوم)





شکل ۳ نمودار جعبه‌ای و ستونی پارامترهای مورد مطالعه (نرمال شده و نرمال نشده)

نمودارهای جعبه‌ای در سمت راست، حاصل داده‌های غیرنرمال و نمودارهای هیستوگرامی (سمت چپ) حاصل داده‌های نرمال شده به همراه نمودار زنگوله‌ای محاط بر هیستوگرام‌ها، نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع فراوانی‌هاست. همان‌گونه که شکل ۳، نشان می‌دهد تنها یک داده مربوط به عامل کیفی TDS خارج از دامنه بود که با انجام عمل نرمال‌سازی نسبت به اصلاح آن اقدام شد. داده‌ها در نمودارهای جعبه‌ای، خطوط داخل هر مستطیل نشان‌دهنده میانه داده‌ها، ضلع پایین مستطیل صدک ۲۵ و ضلع بالایی مستطیل صدک ۷۵ داده‌هاست. نزدیک بودن خطوط میانه عوامل EC و TDS به ضلع پایین مستطیل نمودار جعبه‌ای موید انحراف معیار بیشتر این دو پارامتر است که در جدول ۱ نیز بیشتر بودن انحراف معیار عوامل EC و TDS نسبت به دو پارامتر SAR و pH نشان داده شد. ارتفاع مستطیل‌ها در نمودار جعبه‌ای، واریانس مقادیر عوامل کیفی از صدک ۲۵ تا صدک ۷۵ و خطوط قائم بالا و پایین، مقدار حداکثر و حداقل داده‌ها را نشان می‌دهند. نمودار جعبه‌ای تمامی عوامل کیفی نشان داد که در توزیع مقادیر عوامل کیفی (به‌جزء یک داده TDS)، داده غیرمعمول و پرت وجود ندارد. آماره RMSSE برای سه مدل کروی، دایره‌ای و گوسین نیم-تغییرنمای تئوری برآزش یافته به داده‌ها، از نرم‌افزار ArcGIS استخراج و در جدول ۲ ارائه شده است. ضمن آن‌که در این جدول مقادیر عددی پارامترهای حاصل از بهترین مدل برآزش یافته نسبت به سایر مدل‌ها آورده شده است. پارامترهای مدنظر در مدل بهینه شامل C ، A و $\frac{C}{C+C_0}$ به تفکیک متغیرهای EC، TDS، SAR و pH می‌باشند.

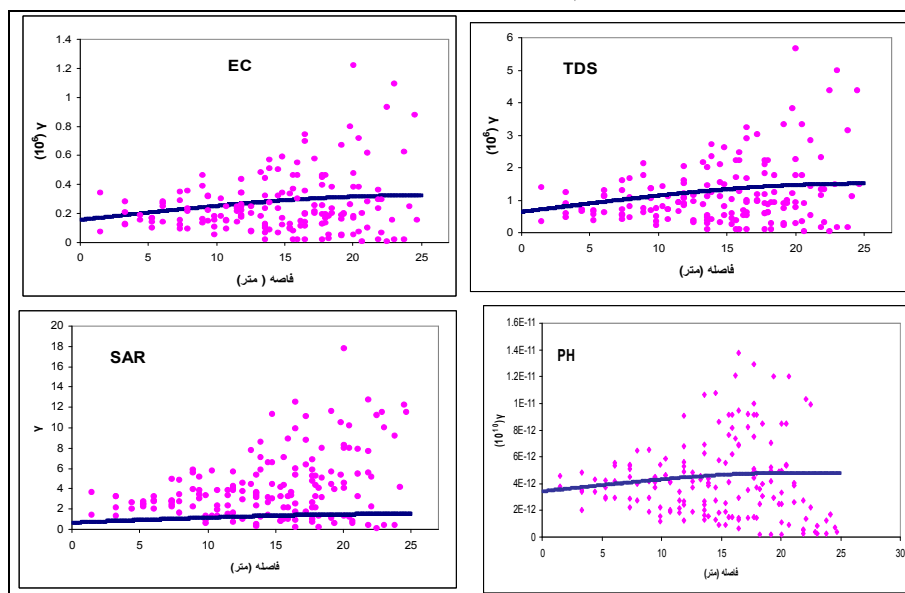
جدول ۲ پارامترهای مربوط به نیم‌تغییرنمای عوامل کیفی آبخوان دشت همدان - بهار

پارامترهای نیم‌تغییرنمای مدل کروی*			جذر میانگین مجذور مربعات خطای استاندارد ($RMSSE$)			متغیر
اثر قطعه‌ای	شعاع تاثیر (متر)	آستانه	نیم‌تغییرنما			
C_0	A	$\frac{c}{c+c_0}$	کروی	دایره‌ای	گوسین	
۱۶۸۴۰۶	۲۱	۰/۵۱	۰/۹۶	۰/۹۷۹	۰/۹۷۵	EC
۸۷۴۳۴	۲۱	۰/۵۸	۰/۹۶	۰/۹۷۵	۰/۹۷۷	TDS
۰/۰۱۳۵	۱۸	۰/۷۲	۰/۹۵۵	۰/۹۶	۰/۹۶۲	PH
۰/۳۶۵۷	۱۸/۲۲	۰/۶۲	۰/۹۵۰	۰/۹۶	۰/۹۵۵	SAR

* پارامترهای مدل بهینه براساس شکل ۳ از نرم‌افزار ArcGIS استخراج شده است.

همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد مدل کروی، مناسب‌ترین مدل نیم‌تغییرنمایی است که با توجه به رفتار آن در نزدیکی مبدا مختصات و کمتر بودن آماره $RMSSE$ انتخاب شد. مقدار جذر میانگین مجذور مربعات خطای استاندارد در نیم‌تغییرنمای کروی برای هر چهار عامل بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۶ بود در حالی که برای دو نیم‌تغییرنمای دیگر بیشتر و بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۸ است. یکسان بودن مدل نیم‌تغییرنمای برازش یافته (مدل کروی) بر داده‌های EC، TDS، pH و SAR به‌عنوان مدلی مناسب، نشانه غالبیت اثر یک عامل (عوامل) مشترک مانند عوامل مدیریتی بر تغییرات مکانی پارامترهای فوق است. زیرا اثر عوامل غیرمدیریتی مانند تغییر اقلیم، نوع مواد مادری و بافت خاک در زمان‌های طولانی مشخص می‌گردد. با توجه به کوتاه بودن طول دوره آماری داده‌ها، تاثیرپذیری تغییرات مکانی عوامل کیفی از عوامل مدیریتی محتمل است. این در شرایطی است که بهترین مدل در توصیف فضایی عوامل مختلف کیفی آب‌های زیرزمینی در مطالعات هو و همکاران (۲۰۰۵: ۸۹۶) برای شوری، توانا و دهان‌زاده (۱۳۸۹: ۳۵) برای pH و اصغری‌مقدم و همکاران (۱۳۸۷: ۱) برای فلوتورید هم مدل کروی گزارش شده است. وجود اثر قطعه‌ای (C_0) یا بخش بدون ساختار واریانس، نشانه تغییرپذیری عوامل کیفی در فواصل کمتر از فواصل نقاط نمونه‌برداری است. خطاهای اندازه‌گیری، تفاوت مدیریت مواد مغذی به‌واسطه تفاوت نوع کشت، تفاوت در مقدار و زمان نیاز به مواد مغذی و تفاوت در ماهیت رفتاری عوامل کیفی می‌تواند منشأ تغییرپذیری فوق باشد که در گزارش تانی و همکاران (۲۰۰۹: ۹۲۵) نیز آمده است. پارامتر آستانه یا تناسب ساختار مکانی داده‌ها، بیان‌کننده نسبت بخش دارای ساختار واریانس به کل واریانس داده‌ها می‌باشد. بزرگ‌تر بودن مقدار آستانه، به مفهوم برقراری تطابق ظاهری داده‌های اندازه‌گیری با داده‌های نیم‌تغییرنمای تجربی است (دانشور و ثوقی و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۶۵). مقدار آستانه داده‌ها بین ۰/۵۱ تا ۰/۷۲ به‌دست آمد که بزرگی آن نشانه همبستگی مکانی داده‌ها و شدت همبستگی

مکانی داده‌هاست. بیشترین شدت همبستگی مکانی به pH معادل ۰/۷۲ و کمترین شدت همبستگی مکانی به EC معادل ۰/۵۱ تعلق دارد. با توجه به جدول ۲ نیم‌تغییرنمای مناسب جهت پایش مکانی عوامل کیفی مورد مطالعه در دشت همدان بهار براساس پارامترهای اثر قطعه‌ای، شعاع تاثیر و آستانه و به دلیل ایجاد واریانس تخمین بیشتر نیم-تغییرنمای کروی (شکل ۴) بود. در شکل ۴ نیم‌تغییرنمای کروی برازش یافته به داده‌ها آمده است.



شکل ۴ نیم‌تغییرنمای تجربی (نقاط) با مدل برازش داده شده (خط) با هر یک از عوامل کیفی مورد

با دقت در منحنی نیم‌تغییرنمای برازش یافته به داده‌ها در شکل ۴ مشاهده می‌گردد که منحنی‌ها روندی در جهت مجانب شدن به مقدار ثابت سقف دارند که به اعتقاد حسنی پاک (۱۳۷۷) نشانه وجود ارتباط مکانی متغیرها است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که تمامی متغیرها مورد بررسی براساس اطلاعات نقاط اندازه‌گیری قابل میان‌یابی هستند.

در جدول ۳ دقت نتایج مربوط به محاسبات نهایی روش‌های مختلف زمین‌آماری برای مدل‌سازی عوامل کیفی آبخوان دشت همدان - بهار براساس محاسبه دو آماره NRMSE و MBE آمده است که به ترتیب دقت و انحراف از مدل را نشان می‌دهند. در این جدول نتایج مدل‌سازی روش تابع پایه شعاعی (RBF)، روش کریجینگ با سه مدل نیم‌تغییرنمای کروی، گوسین و دایره‌ای و روش معکوس فاصله وزنی (IDW) با توان‌های ۲، ۳ و ۴ آمده است. علت تنظیم جدول ۳ برای تمامی روش‌های میان‌یابی، نشان دادن برتری روش کریجینگ با نیم-تغییرنمای کروی است.

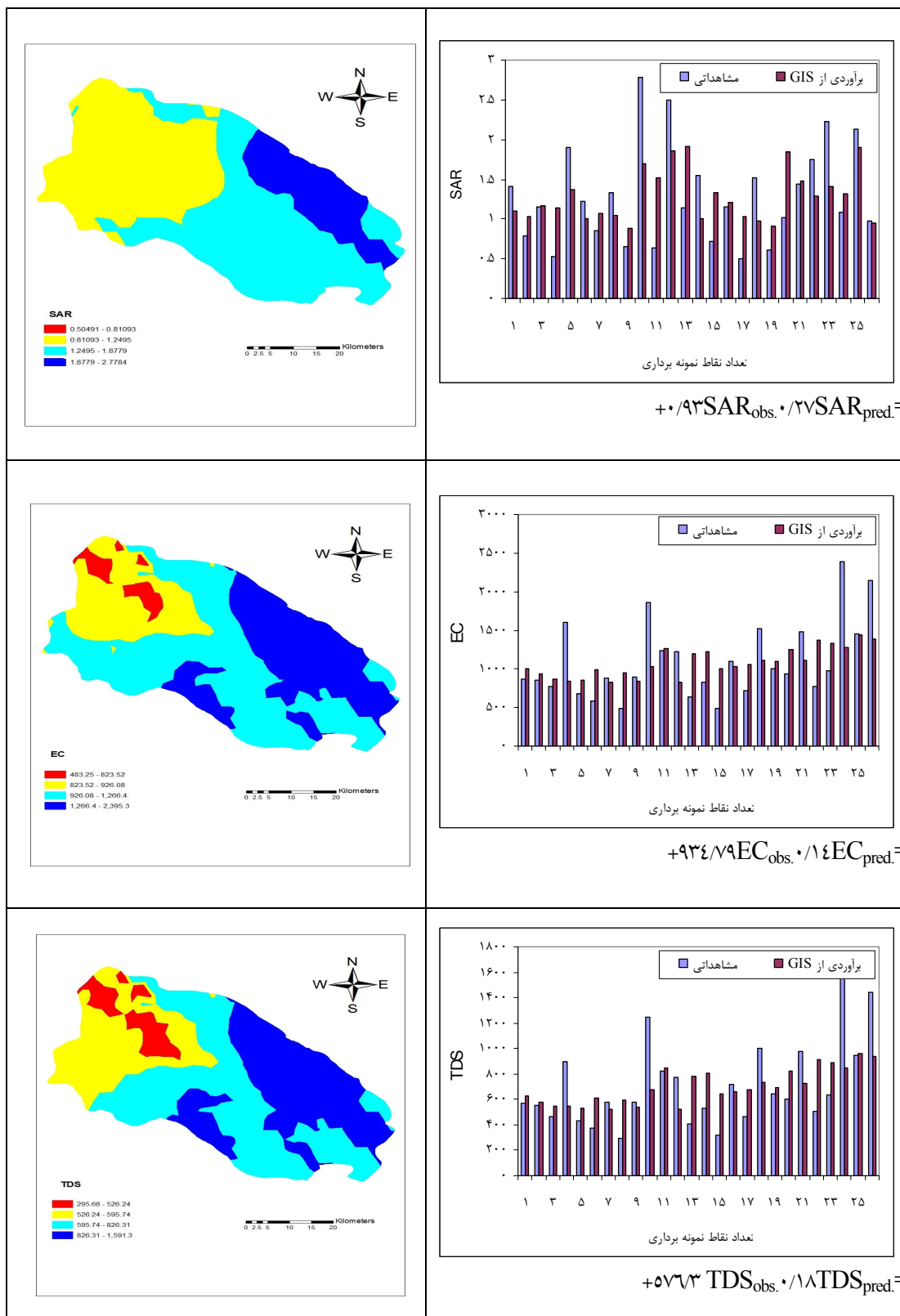
جدول ۳ مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آمار در مکان‌یابی پارامترهای کیفیت آب دشت همدان-بهار

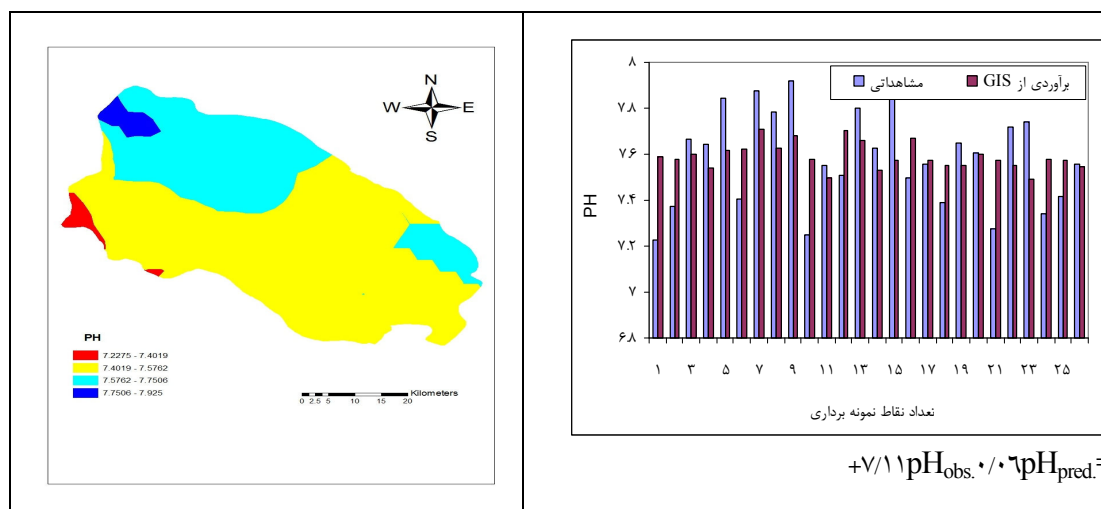
روش مدل‌سازی						شبهه توابع شعاعی	آماره	واحد	متغیر
معکوس فاصله وزنی			کریجینگ معمولی						
توان			نیم‌تغییرنما						
۴	۳	۲	دایره‌ای	گوسین	کروی				
۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۵	NRMSE	(میلی‌گرم بر لیتر)	TDS
-۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۰	-۰/۰۲	MBE		
۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۳	NRMSE	(—)	pH
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	MBE		
۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۳۵	۰/۴۹	NRMSE	(—)	SAR
-۰/۰۳	-۰/۰۱۹	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۰/۰۴	MBE		
۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۵	NRMSE	(میکروموس بر سانتی‌متر)	EC
-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۲	MBE		

مقادیر هاشور خورده در جدول ۳ نشان‌دهنده بهترین روش برآورد، یعنی روش کریجینگ در میان‌یابی برای نقاط فاقد اندازه‌گیری هستند. کمتر بودن مقادیر NRMSE در روش کریجینگ در مقایسه با روش معکوس فاصله وزنی و روش توابع پایه شعاعی نشان‌دهنده بیشتر بودن دقت فضایی روش کریجینگ با نیم‌تغییرنمای کروی است. هر چند دقت روش کریجینگ با دو مدل نیم‌تغییرنمای دیگر نیز در سطح قابل قبول قرار دارند. هم‌چنین کمتر بودن آماره MBE بیان‌گر اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده در مقایسه با مقادیر مشاهداتی روش کریجینگ است. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که روش زمین‌آمار کریجینگ دارای برتری قابل ملاحظه نسبت به روش معکوس فاصله وزنی و روش توابع پایه شعاعی در تحلیل مکانی خصوصیات کیفی آب زیرزمینی باشد. جدول ۳ نشان می‌دهد کمترین دقت مربوط به توان چهارم روش معکوس فاصله وزنی و بیشترین دقت مربوط به مدل کروی در روش مدل‌سازی کریجینگ عمومی است. نتایج حاصل از اعمال توان‌های مختلف در روش معکوس فاصله وزنی نشان داد با افزایش عدد توان و افزایش تعداد نقاط همسایگی این دقت کاهش بیشتری یافته است. با ملاحظه در نتایج مربوط به روش معکوس فاصله وزنی (جدول ۳) مشخص می‌گردد که این کاهش دقت از ناحیه افزایش توان، برای همه عوامل کیفی در هر دو آماره NRMSE و MBE وجود دارد. این کاهش دقت می‌تواند ناشی از تاثیرپذیری مقدار برآوردی در یک نقطه از تعداد بیشتری نقاط همسایگی به دلیل دور بودن و خطای اندازه‌گیری ناشی از تعدد نقاط بیشتر باشد. جدول ۳ نشان می‌دهد در روش مدل‌سازی کریجینگ کمترین خطای مدل‌سازی براساس دو آماره NRMSE و MBE معادل صفر به پارامتر pH و بیشترین خطای

مدل‌سازی معادل $NRMSE=0/42$ و $MBE=-0/01$ میلی‌گرم در لیتر به پارامتر EC تعلق دارد. بیشتر بودن خطای مدل‌سازی EC و کمتر بودن خطای مدل‌سازی pH با توجه به کمتر بودن مقدار اثر قطعه‌ای محاسباتی در جدول ۲ قابل تایید است و در گزارش دلبری و همکاران (۱۳۸۹: ۳۵۹) هم آمده است. همان‌گونه که اشاره شد آماره $NRMSE$ نشان‌دهنده دقت مدل‌سازی، مقادیر مثبت آماره MBE نشانه برآورد بیش از مقادیر اندازه‌گیری و مقادیر منفی آن نشانه برآوردهای کمتر از مقادیر اندازه‌گیری است. بنابراین منفی بودن آماره MBE در جدول ۳ حاکی از میان‌یابی مقادیر کمتر از مقادیر اندازه‌گیری برای عامل EC و TDS است. در مجموع نتایج گزارش شده در پاره‌ای از تحقیقات مانند بررسی تغییرات مکانی عوامل TDS و pH توسط شعبانی (۱۳۸۷: ۴۷) در دشت ارسنجان یزد و تحلیل مکانی خصوصیات آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز گرمسار توسط زهتابیان و همکاران (۱۳۸۹: ۶۱) برتری روش کریجینگ را به‌عنوان ابزار مناسب جهت مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی آن‌ها در مناطق گوناگون ایران پیشنهاد کرده‌اند. خطای میان‌یابی در مطالعه شعبانی (۱۳۸۷: ۴۷) برای پارامتر TDS، برابر $0/47$ ، و در مطالعه رضایی و همکاران (۱۳۸۹: ۹۳۲) برای SAR، معادل $0/98$ گزارش شده در حالی که در مطالعه حاضر مقدار خطای میان‌یابی TDS و SAR به ترتیب $0/42$ و $0/35$ به دست آمد که بیان‌گر دقت بیشتر میان‌یابی است. خاصیت هموارسازی در روش کریجینگ باعث کمتر شدن میزان واریانس داده‌های میان‌یابی شده در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده است. هم‌چنین جدول ۳ نشان می‌دهد خطای برآورد تمامی پارامترها کمتر از $0/42$ است که نشان‌دهنده قابلیت بالای روش مدل‌سازی کریجینگ در میان‌یابی عوامل کیفی است. بررسی نتایج این تحقیق و مقایسه با نتایج دیگر تحقیقات حاکی از نقش پراکنش نقاط نسبت به مرکز ثقل دشت و تعداد نقاط است (طباطبایی و غزالی، ۱۳۹۰: ۱۱). شکل ۱ نشان می‌دهد دشت شکل بیضی داشته لیکن نقاط اندازه‌گیری در محدوده آبخوان اصلی است که از پراکندگی مناسبی برخوردار هستند. از نظر تعداد داده‌های اندازه‌گیری نیز زو و همکاران (۲۰۰۶: ۸۱) حداقل داده لازم برای داشتن دقت خوب را ۱۰۰ داده دانسته که در این مطالعه برای هر یک از عوامل کیفی ۱۰۰ داده و در مجموع برای چهار عامل، ۴۰۰ داده به‌کار گرفته شد.

برای بررسی جامع‌تر نتایج به‌دست آمده، شمای گرافیکی توزیع پارامترهای کیفی در محدوده مورد مطالعه تهیه و در شکل ۵ نمایش داده شد. شکل ۵ نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از چهار پارامتر SAR، EC، TDS و pH، با هدف مقایسه تغییرات مکانی پارامترها طی دوره مورد مطالعه به روش کریجینگ با مدل کروی را نشان می‌دهد. پهنه‌بندی انجام شده در این شکل براساس اطلاعات دو ساله در ۲۵ چاه مشاهداتی واقع در آبخوان دشت می‌باشد. به‌عبارت دیگر در بخش آبخوان، پهنه‌بندی‌ها به‌منظور درون‌یابی عوامل کیفی و در سطح دشت برون‌یابی عوامل کیفی براساس اطلاعات آبخوان صورت گرفته است. هم‌چنین میانگین هر چهار پارامتر کیفی میان‌یابی شده با روش زمین‌آماری کریجینگ در مقایسه با میانگین اندازه‌گیری شده در چاه‌های مورد مطالعه به‌صورت نمودار ستونی آمده است.





شکل ۵ پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب دشت همدان- بهار طی دو سال گذشته

براساس شکل ۵ نحوه تغییرات عوامل TDS و EC و تا حدودی SAR مشابه یکدیگر هستند. یکی از دلایل اصلی این تشابه تغییرات EC با TDS ارتباط خطی این دو پارامتر است. همچنین تخلیه فاضلاب‌های شهری در ناحیه جنوب شرقی دشت (حوالی شهرک فرهنگیان) نیز موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها در این ناحیه و حرکت آن‌ها در امتداد شمال شرق به دلیل ارتباط هیدرولوژیکی آبخوان از ناحیه شمال شرق با دشت کبودرآهنگ می‌باشد که در شکل ۵ به صورت مکان‌های پررنگ‌تر نشان داده شده است. مقادیر EC، TDS و SAR با دور شدن از امتداد جنوب شرق به شمال شرق کاهش یافته است. اما تغییرات پارامتر pH غیریکنواخت‌تر از سه پارامتر دیگر بوده و حداکثر آن در شمال غربی دشت اتفاق افتاده است. از طرفی کمتر بودن مقدار آلاینده‌ها در ناحیه شمال غرب به دلیل اجرای طرح تغذیه مصنوعی (هارون‌آباد) و نفوذ جریان‌های سطحی جاری از دامنه‌های الوند در ناحیه غربی دشت به عنوان محل‌های عمده تغذیه است. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که پارامترهای کیفی آب زیرزمینی الگوی تصادفی نداشته و دارای پراکنش مکانی می‌باشند. در مجموع می‌توان اظهار داشت، بخش جنوب شرقی منطقه نسبت به سایر بخش‌ها از کیفیت آب زیرزمینی پایین‌تری برخوردار است. به نظر می‌رسد که عوامل مدیریتی مانند آب‌شویی کودهای زراعی و پساب‌های صنعتی یا شهری باعث نفوذ به سفره آبدار دشت همدان- بهار و تغییرات در عوامل کیفی شده است که در گزارش زارع ایبانه و همکاران (۲۰۱۲: ۴۳۳) نیز آمده است. قاسمی و همکاران (۱۳۸۹: ۱۰۹) نیز کیفیت پایین آب زیرزمینی دشت همدان- بهار را به واسطه تغذیه منابع آلاینده شهری و صنعتی مثل کارخانه شیشه و کشتارگاه دانستند. مقایسه برآورد تغییرات مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی به تفکیک چاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۵ نشان می‌دهد، در بیشتر نقاط دقت روش زمین‌آمار مطلوب و قابل قبول می‌باشد. بیشترین اختلاف بین نقاط برآوردی با مشاهداتی در نقاط مرزی و نقاط حداکثری می‌باشد. به عبارت دیگر دقت روش زمین‌آمار در برآورد نقاط درون محدوده مورد مطالعه. نقاط غیر حداکثری پارامترهای مورد مطالعه بیشتر می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند ناشی از کمبود نقاط اندازه‌گیری در مرزهای مطالعاتی و

وجود عوامل متعدد اقلیمی و منطقه‌ای در ایجاد نقاط حداکثر باشد که در روش زمین آمار لحاظ نمی‌گردد. طباطبایی و غزالی (۱۳۹۰: ۱۱) از دیگر عوامل موثر در خطا را کشیدگی طولی دشت و دوری از شعاع همسایگی گزارش کرده‌اند. در این راستا کشیدگی در امتداد شمال شرقی - جنوب غربی دشت همدان - بهار (شکل ۱) و شعاع تاثیر ۲۱-۱۸ متری (جدول ۳) می‌تواند در دقت نتایج موثر باشد.

۵. نتیجه‌گیری

تغییرات مکانی غلظت یون‌های موجود در آب‌های زیرزمینی در ردیف متغیرهای ناحیه‌ای هستند که مقادیر آن در فضایی یک، دو و یا سه بعدی توزیع یافته است. مقدار متغیرهای محیطی در هر نقطه مستقل از مختصات جغرافیایی و وابسته به اختلاف فاصله نقاط از یکدیگر است که زمین‌آمار قادر به مدل‌سازی چنین متغیرهایی در قالب نظریه احتمال و تابع تصادفی نیم‌تغییرنما است. نتایج پژوهش حاضر بیان‌گر برتری روش زمین‌آمار در کریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای کروی نسبت به روش معکوس فاصله وزنی و روش توابع پایه شعاعی در تحلیل مکانی خصوصیات کیفی آب زیرزمینی دشت همدان - بهار بود. مقایسه دقت روش کریجینگ در برآورد تغییرات مکانی چهار پارامتر EC، SAR، TDS، pH و pH نشان داد پارامتر pH دارای کمترین خطای مدل‌سازی براساس دو آماره NRMSE و MBE معادل صفر و پارامتر EC بیشترین خطای مدل‌سازی معادل $NRMSE=0/42$ و $NRMSE=0/01$ - $MBE=$ میلی‌گرم در لیتر بود. از طرفی پهنه‌بندی تغییرات مکانی پارامترها موبد کاهش کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از بخش جنوب شرق به شمال شرق بود. دلیل این امر را می‌توان تخلیه فاضلاب‌های شهری در حاشیه جنوب شرق آبخوان، وجود شهرک صنعتی بوعلی در جنوب شرقی آبخوان و ارتباط هیدرولوژیکی در شمال شرق دانست. در مجموع روش زمین‌آمار کریجینگ و نتایج تخمین، نشان‌دهنده شرایط خوب منطقه مورد مطالعه از نظر میان‌یابی عوامل کیفی آب‌های زیرزمینی است. ضمن آن‌که بیشتر بودن تعداد اطلاعات اولیه و بالاتر بودن درجه صحت آن‌ها موجب صحت و درستی بیشتر نتایج می‌شود.

کتابنامه

- اصغری مقدم، ا.، ندیری، ع. و فیجانی، ا.، "پیش‌بینی مکانی غلظت فلورید در منابع آب زیرزمینی دو دشت بازرگان و پلدشت". سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه تبریز، ۱۳۸۷.
- بلالی، ح.، خلیلیان، ص. و احمدیان، م.، "بررسی نقش قیمت‌گذاری آب در بخش کشاورزی بر تعادل منابع آب زیرزمینی"، نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱۳۸۹، ۲۴ (۲): ۱۹۴-۱۸۵.
- دانشور وثوقی، ف.، دین پژوه، ی. و تقی اعلمی، م.، "تأثیر خشکسالی بر تراز آب زیر زمینی در دو دهه اخیر (مطالعه موردی: دشت اردبیل)"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۰، ۲۱ (۴): ۱۶۵-۱۷۹.

- دلبری، م.، افراسیاب، پ. و میرعمادی، س.ر.، "تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی شوری و عمق آب زیرزمینی (مطالعه موردی: استان مازندران)"، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳۸۹، ۳ (۴): ۳۷۴-۳۵۹.
- قره محمودلو، م.، طهماسبی، ا. و محمدی، ا.، "شناسایی فرآیندهای موثر در منشاء نمک‌های محلول مرزی اترک با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۷.
- قاسمی، ع.، زارع ابیانه، ح.، شهسوار، ا. و یعقوبی کیکله، ب.، "بررسی تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت همدان - بهار"، گیاه و زیست بوم، ۱۳۸۹، ۶ (۲۳): ۱۰۹-۱۲۷.
- حسینی پاک، ع.ا.، "زمین‌آمار"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷، ۳۱۴ ص.
- خداکرمی، ل.، سفیانیان، ع.ر.، میرغفاری، ن.، افیونی، م. و گلشاهی، ا.، "پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در خاک‌های سه زیر حوزه آبخیز استان همدان با استفاده از فناوری‌های GIS و زمین‌آمار"، مجله علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۹۰، ۱۵ (۵۸): ۲۴۳-۲۵۴.
- مقامی، ی.، قضاوی، ر.، ولی، ع. و شرفی، س.، "ارزیابی روش‌های مختلف درون یابی به منظور پهنه بندی کیفیت آب با استفاده از GIS (مطالعه موردی: شهرستان آباده)"، فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۱۳۹۰، ۲ (۱): ۱۷۱-۱۷۲.
- نظری‌زاده، ف.، ارشادیان، ب. و زند وکیلی، ک.، "بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بالارود در استان خوزستان"، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوزه‌های کارون و زاینده‌رود. دانشگاه شهرکرد، ۱۳۸۵.
- رضایی، م.، دواتگر، ن.، تاجداری، خ. و ابولپور، ب.، "بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین‌آمار، نشریه آب و خاک، ۱۳۸۹، ۲۴ (۵): ۹۳۲-۹۴۱.
- صفری، م.، "تعیین شبکه بهینه پایش آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۱، دانشگاه تربیت مدرس.
- سلاجقه، ع.، رضوی‌زاده، س.، خراسانی، ن.، حمیدی‌فر، م. و سلاجقه، س.، "تغییرات کاربری اراضی و آثار آن بر کیفیت آب رودخانه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کرخه)"، محیط شناسی، ۱۳۹۰، ۳۷ (۵۸): ۸۶-۸۱.
- شکوری کتیگری، م.، شعبانپور، م.، اسدی، ح. و دواتگر، ن.، "تعیین مناسبترین مقیاس مطالعه در برآورد کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاکدر اراضی شالیزاری"، مجله دانش آب و خاک، ۱۳۹۰، ۲۱ (۲): ۱۰۹-۱۲۰.
- شعبانی، م.، "تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات Ph و TDS آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارسنجان)"، مجله مهندسی آب، ۱۳۸۷، سال اول: ۴۷-۵۸.
- سبزعلی‌پور، س.، جعفرزاده، ن.، منوری، م. و مجتهدزاده، ز.، "بررسی پارامترهای کیفی پساب در واحد الفین پتروشیمی بندر امام"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۸۶، سال هجدهم، شماره ۴۹: ۶۳-۳۹.

- طباطبائی، س.ح. و غزالی، م.، "ارزیابی دقت روش‌های میان‌یابی در تخمین سطح ایستابی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان‌های فارسان - جوتقان و سفید دشت)"، مجله علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۹۰، ۱۵ (۵۷): ۲۲-۱۱.
- توانا، ا. و دهان‌زاده، ب.، "پیش‌بینی پراکنش مکانی اسیدپت‌آب‌های زیرزمینی دشت نیشابور با استفاده از زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی"، فصلنامه مهندسی آب، ۱۳۸۹، ۱: ۳۵-۴۹.
- زهتابیان، غ.ر.، جان‌فزا، ع.ا.، محمدعسگری، ح. و نعمت‌الهی، م.ج.، "مدلسازی توزیع مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی آبهای زیرزمینی (مطالعه موردی در حوزه آبخیز گرمسار)"، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۳۸۹، ۱۷ (۱): ۶۱ - ۷۳.
- Ahmed, S., 2002. Groundwater monitoring net work design: application of geostatistics with a few case studies from a granitic aquifer in a semi - arid region. *American Journal*. 67 (5), 1564-1571.
- Asghari Moghaddam, A., Nadiri, A., Fijani, A., 2008. Spatial prediction of fluoride concentration in groundwater resources in Bazargan and Poldasht plains . 3th Conference of Iran Water Resources Management. Tabriz University. 1-12.
- Balali, H., Khalilian, S., Ahmadian, M., 2010. Annalysis of impacts of irrigation water pricing on groundwater balance. *Journal of Economics and agricultue development*. 24 (2), 185-194.
- Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y., Aalami, M., 2011. Effect of Drought on Groundwater Level in the Past Two Decades (Case study: Ardebil Plain). *Water and soil science* 21 (4), 165-179.
- Delbari, M., Afrasiab P., Miremadi, S. R., 2011. Spatio-temporal Variability Analysis of Groundwater Salinity and Depth (Case study: Mazandaran province). *Iranian Journal of Irrigation and drainage* 3(4), 359-374.
- Finke, P.A.; Brus, D.J.; Bierkens, M.F.P., Hoogland, T.; Knotters, M., Vries, F., 2004. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. *Geoderma*. 123, 23-39.
- Gaus, I., Kinniburgh, D.G., Talbot, J.C., Webster, R., 2003. Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging. *Environmental Geology*. 44 (8), 939-948.
- Geladi, P. and Kowalski, B.R. 1986. Partial least-squares regression: a tutorial. *Analytica Chimica Acta*. vol 185, 1-17.
- Ghareh Mahmoudloo, M., Tahmasebi, A., Mohmadi, A., 2008. Effective processes to identify the origin of soluble salts Atrak border using multivariate statistical methods. 3th Conference of Iran Water Resources Management. Tabriz University. 1-9.
- Ghasemi, A., Zareabayneh, H., Shahsavar, A.M., Yaghobi Kikleh, B., 2010. The study of variation of quality and quantity of groundwater in Hamedan- Bahar Area. *Plant and Ecosystem* 6(23), 109-127.
- Hasani Pak, A.A., 2008. Geostatistical. Tehran University Publications. 314 pp.
- Hu, K., Huang, Y., Li, H., Li, B., Chen, D., White, R.E., 2005. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. *Environment international*. 31(6), 896 - 903.

- Khodakarami, L., Soffianian, A., Mirghafari, N., Afyuni, M., Golshahi, A., 2012. Concentration Zoning of Chromium, Cobalt and Nickel in The Soils of Three Sub-Basin of The Hamadan Province Using GIS Technology and the Geostatistics. *JWSS - Isfahan University of Technology* 15 (58), 243-254.
- Kravchenko, A.N., 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of. AM. J.* 67, 1564- 1571.
- Kresic, N., 1997. *Hydrogeology and Groundwater Modeling*. Lewis Publishers. 461 pp.
- Lu, G., David, Y., Wong, W., 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*. 34(9), 1044-1055.
- Lu, G.Y., Wong, D., 2008. An Adaptive Inverse Distance Weighting Spatial Interpolation Technique. *Computers & Geosciences*. 34, 1044-1055.
- Maghami, Y., Ghazavi, R., Vali, A. A., Sharafi, S., 2011. Evaluation of spatial interpolation methods for water quality zoning using GIS Case study, Abadeh Township. *Journal of Geography and Environmental Planning* 42 (2), 171-172.
- McBratney, A.B., Pringle, M.J., 1997. Spatial variability in soil-implications for precision agriculture. Pp 3-32. In: Stafford JV, (ed.). *Precision Agriculture '97. Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture*, Warwick University, UK.
- Nazari Zadeh, F., Ershadian, B., Zand vakili, K., 2006. Study of spatial variability of groundwater quality of Balarood plain in Khuzestan province. The first regional conference of Karoon and Zayandehrood water resources. *Shahrekord* 1-5.
- Rezaei, M., Davatgar, N., Tajdari, K., Abolpour B., 2010. Investigation the Spatial Variability of Some Important Groundwater Quality Factors in Guilan, Iran. *Journal of Water and Soil* 24 (2), 932-941.
- Safari, M., 2002. Determine the optimal network of groundwater monitoring using geostatistical methods. thesis MSc.. Tarbiat Modarres University.
- Salajegheh, A., Razavizadeh, S., Khorasani, N., Hamidfar, M., Salajegheh, S., 2011. Land use changes and its effects on water quality (Case study: Karkheh watershed). *Journal of Environmental studies* 37 (58), 81-86.
- Schöning, i., Totsche, K.U., Kogel-Knabner, I., 2006. Small Scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested luvisol. *Geoderma* 136, 631-642.
- Shakouri, M., Shabanpour, M., Asadi, H., Davatgar, N., 2010. Dermination of Suitable Study Scale in Estimating Organic Carbon and Bulk Density in Paddy Soils. *Water and soil science* 21 (2), 109-120.
- Shabani, M. 2009. Determination of the most suitable geostatistical method for the ph and TDS mapping of groundwater resources (case study: the arsanjan plain). *Journal of water Engineering* 1 (1), 47-57.
- Sabzalipour, S., Jafarzadeh, N., Monavari, M., Mojtahed zadeh, A., 2010. Qualitative Survey of the Effluent from the Olefin Unit of Bandar-e-Imam Petrochemical Complex. *Journal of Water and Wastewater* 18 (49), 39-63.
- Sun, Y., Shaozhong, K., 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.

- Taany, R.A., Tahboub, A.B., Saffarini, G.A., 2009. Geostatistical analysis of spatiotemporal variability of groundwater level fluctuations in Zarqa basin, Jordan: A case study. *Environ. Geol.* 57, 525 – 535.
- Tabatabaei, S.H., Ghazali, M., 2011. Accuracy of interpolation methods in estimating the groundwater level (Case study: Farsan-Jooneghan and Sefiddasht Aquifes). *Journal of Water Science* 15(57), 11-22.
- Tavana, A. and Dahanzadeh, B., 2010. Prediction of the spatial distribution of neishabour plan groundwater informatio system. *Journal of water engineering (JWE)* 1 (1), 35-49.
- Theodossiou, N., Latinopoulos, P., 2006. Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the kriging methodology. *J. of Environmental Modeling and Software.* 21, 991-1000.
- Xu, C., Gong, L., Jiang T., Chen, D., Singh, V.P., 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology* 327, 81– 93.
- Zare Abyaneh, H., Bayat Varkeshi, M., Mohammadi, K., Howard, K., Marofi, S., 2012. Assessment of groundwater corrosivity in Hamedan Province, Iran using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Geosciences Journal* 51 (4), 433-439.
- Zehtabian, Gh., Janfaza, E., Mohammad asgari, H., Nematollahi, M.J., 2010. Modeling of ground water spatial distribution for some chemical properties (Case study in Garmsar watershed). *Iranian journal of Range and Desert Reseach* 17(1), 61-73.