

بررسی تغییرات مکانی شوری و قلیائیت آب‌های زیرزمینی استان اصفهان با استفاده از زمین آمار

رضا جعفری* و لیلا بخشنده مهر^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۱۱)

چکیده

کاهش مداوم کیفیت آب زیرزمینی برای فعالیت‌های مختلف کشاورزی در مناطق پهناور خشک و نیمه‌خشک به یک نگرانی اساسی مبدل شده است. بنابراین پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی در یک مقیاس کلان در مدیریت اراضی امری ضروری می‌باشد. هدف مطالعه حاضر پهنه‌بندی توزیع مکانی دو شاخص مهم کیفیت آب زیرزمینی شامل EC و SAR با استفاده از تکنیک‌های زمین آمار در استان اصفهان می‌باشد. تکنیک‌های زمین آمار مختلف مانند کریجینگ، IDW و RBF بر داده‌های ۵۴۰ حلقه چاه اعمال و نقشه پیوسته EC و SAR در محیط نرم افزار ArcGIS 9.3 تهیه گردید. مطابق نتایج، از میان روش‌های مختلف، روش کریجینگ با مدل واریوگرامی دایره‌ای بهترین عملکرد و کمترین خطا را نشان داد. بنابراین، نقشه‌های تولید شده این روش براساس روش تقسیم‌بندی کیفیت آب ویل کاکس مورد طبقه بندی قرار گرفت. نتایج نشان داد که EC بین ۳۹۲/۲ میکروموس بر سانتی‌متر در غرب استان تا ۱۷۹۱۷/۶ در مناطق شمال و شرق منطقه مطالعاتی متغیر است. حداکثر و حداقل شاخص SAR نیز برای شهرستان‌های خور و بیابانک و سمیرم به ترتیب بین ۳۸/۹ تا ۰/۱۳ تخمین زده شد. مطابق روش ویل کاکس، ۱۲/۱۳٪ از آب‌های زیرزمینی استان به‌عنوان کلاس خوب، ۱۶٪ متوسط، ۱۷/۵٪ نامناسب و ۵۴/۳۵٪ به‌عنوان کلاس غیرقابل استفاده طبقه‌بندی گردید. به‌طور کلی، کیفیت آب زیرزمینی استان اصفهان از لحاظ کشاورزی، از جنوب به شمال و همچنین از غرب به شرق مخصوصاً در پلایا (اراضی فاقد کشاورزی) که کلاس کیفیت آب غیرقابل استفاده غالب است کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: تکنیک های زمین آمار، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل های واریوگرامی، کیفیت آب زیرزمینی

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: reza.jafari@cc.iut.ac.ir

مقدمه

شرایط خاص اقلیمی، به‌ویژه بارش کم و تبخیر بالا از جمله عوامل محدود کننده در مناطق خشک و نیمه‌خشک، محسوب می‌شود. استفاده بهینه از اندک منابع آبی موجود و حفظ این منابع ارزشمند از اصول اولیه مدیریت منابع طبیعی در این مناطق به‌شمار می‌رود. شور و قلیایی شدن آب و خاک دو پدیده متقابل و وابسته به یکدیگر بوده و از جمله عوامل عمده بیابان‌زایی به‌ویژه در مناطق بیابانی محسوب می‌شوند (۴، ۱۶ و ۱۹). داشتن اطلاعات در رابطه با کیفیت و کمیت آب زیرزمینی به‌جهت رشد جمعیت جهان و وابستگی آن به این منبع از اهمیت بالایی برخوردار است. وابستگی جمعیت به سیستم‌های آبی که آب زیرزمینی را برای ذخیره‌گاه‌های آب آشامیدنی به‌کار می‌برند در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ افزایش یافت و در این دوره زمانی تخلیه چاه‌ها در حدود ۵ برابر بیشتر شد (۲۱) و کیفیت و قابلیت دسترسی آب زیرزمینی به‌عنوان یک موضوع مهم زیست محیطی برای شهروندان دنیا مدنظر قرار گرفت. حفاظت طولانی مدت، توسعه محتاطانه و مدیریت این منابع طبیعی برای حفظ این سرمایه گرانب‌های جهانی ضروری است.

مطالعات بسیاری در ارتباط با به‌کارگیری ابزارها و روش‌های مدرن جهت بررسی و ارزیابی منابع آب مورد استفاده بشر صورت گرفته است. در این مطالعات سعی شده تا بررسی کیفی منابع آب به‌طور دقیق‌تر، با صرف هزینه و زمان کمتر انجام گیرد. سامانه اطلاعات جغرافیایی (Geographic Information System, GIS) یکی از شایع‌ترین این ابزارهاست. قابلیت‌های این سامانه و نرم‌افزارهای تحت پوشش آن در زمینه‌های مختلف جغرافیایی و منابع طبیعی مورد استفاده و آزمون قرار گرفته و نتایج مثبت بسیاری به‌دنبال داشته است. تکنیک‌های زمین‌آماری یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این سامانه می‌باشد. زمین‌آماری شاخه‌ای از علم آمار است که بر مجموعه داده‌های مکانی و زمانی - مکانی متمرکز بوده و در واقع برای پیش‌بینی و تخمین پراکنش‌های احتمالی داده‌ها در سطح زمین

به‌کار رفته است. زمین‌آمار با استفاده از روش‌های میان‌یابی، سطوحی از داده‌ها ارائه می‌نماید که دارای همبستگی مکانی هستند. نقشه‌های حاصل از تکنیک‌های زمین‌آمار به‌عنوان ابزارهای گزینش اولیه برای اعمال سیاست‌های تصمیم‌گیری در استراتژی‌های مدیریت آب زیرزمینی در مقیاس محلی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۱).

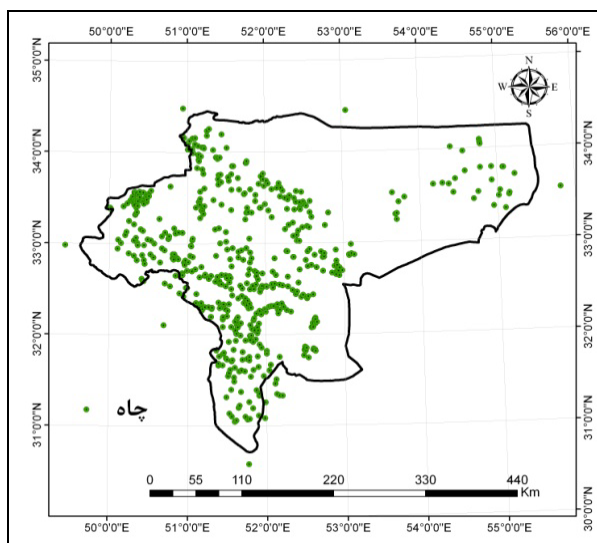
زهنایان و همکاران (۴) کیفیت آب زیرزمینی دشت ورامین را جهت استفاده در آبیاری با استفاده از روش‌های زمین‌آمار مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه ایشان ابتدا سطح آب زیرزمینی و عمق سفره بحرانی مورد بررسی قرار گرفته و نقشه آن تهیه شد. سپس با استفاده از دیاگرام ویل کاکس و داده‌های کیفی آب زیرزمینی نقشه قابلیت آبیاری در کل دشت ترسیم گردید. برطبق این مطالعه، کیفیت نامناسب آب آبیاری و افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند منجر به شوری‌زایی، تخریب خاک در اراضی کشاورزی و به دنبال آن بیابان‌زایی گردد. سامسون و همکاران (۲۱) به‌منظور بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی شهر تیروچیراپالی (Tiruchirappalli) هندوستان با هدف استفاده شرب، ۱۲ پارامتر فیزیکی و شیمیایی در ۷۹ حلقه چاه پراکنده در سطح شهر را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نقشه تغییرات کیفیت آب زیرزمینی را با استفاده از روش‌های میان‌یابی در محیط نرم‌افزار MATLAB تهیه نمودند و نتایج را به‌صورت خطوط متمرکز هم‌میزان برای هر یون ارائه کردند. براساس نتایج این محققین روش زمین‌آماری کریجینگ، مناسب‌ترین روش برای میان‌یابی پارامترهای شیمیایی آب زیرزمینی بوده است. عسکری و همکاران (۹) با استفاده از تحلیل‌های مکانی زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان در این مطالعه ابتدا عوامل کاهنده کیفیت منابع آب زیرزمینی را شناسایی و سپس هدایت الکتریکی و میزان کلر ۶۴ چاه در این محدوده را اندازه‌گیری نمودند. پس از آن پهنه‌بندی این دو پارامتر با استفاده از تکنیک‌های مختلف زمین‌آمار از جمله کریجینگ، (Inverse Distance Weighting) IDW، RBF،

برازش گوسی را بهتر از دیگر مدل‌ها معرفی کردند. سوراکالیچ (۲۲) کیفیت آب زیرزمینی منطقه غرب استرالیا را با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار مورد بررسی قرار داد. او ۴ مدل واریوگرامی کریجینگ را شامل مدل‌های کروی، دایره‌ای، نمایی و گوسی را بر روی داده‌های منطقه مورد مطالعه‌اش برازش داده و میان‌یابی پارامترها را با استفاده از این مدل‌ها انجام داد. برطبق نتایج این مطالعه، روش کریجینگ با مدل واریوگرامی نمایی بهترین نتیجه را برای میان‌یابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی ارائه می‌کند.

از دهه ۱۹۶۰ در ایران بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی با دسترسی به پمپ‌های برقی افزایش یافته است. طبق مطالعات انجام شده در مناطق هموار یک کاهش چشمگیر در سطح آب زیرزمینی رخ داده که موجبات فرونشست زمین را فراهم کرده است. به‌عنوان مثال، قزوین به‌علت برداشت بی‌رویه (۱/۲ میلیارد مترمکعب در سال) از چاه‌های قانونی (۳۹۷۳ حلقه چاه عمیق و ۶۰۸۳ چاه نیمه عمیق) و چاه‌های غیرقانونی (۳۰۰ حلقه چاه) از جمله استان‌های مواجه با پدیده بیابان‌زایی است که با کمبود بحرانی آب زیرزمینی روبرو است و سالانه با افت سطح آب زیرزمینی حداقل ۱/۵ متر روبرو است. تخمین زده می‌شود که حدود نیمی از دشت‌های کشور با فرونشست زمین تهدید می‌گردد. دشت کاشان در استان اصفهان سالانه حدود ۶۰ سانتی‌متر افت سطح آب زیرزمینی دارد که پیامد آن شور شدن آب و به‌تبع آن شور شدن خاک و افزایش بیابان‌زایی در منطقه می‌باشد (۱۴ و ۱۷). همان‌طور که می‌دانیم برنامه‌ریزی‌ها و اتخاذ تصمیمات مدیریتی و همچنین مطالعه روند بهبود یا تخریب منابع آب در مقیاس استانی نیاز به داده‌ها و نقشه‌هایی با توزیع مکانی پیوسته در مقیاس کلان دارد. بنابراین به‌علت عدم وجود چنین نقشه‌هایی مطالعه حاضر با اهداف ذیل به‌منظور ارائه یک تصویر مستند و کلی از کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف آبیاری و کشاورزی صورت گرفته است: ۱) مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آمار در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی در سطح استان اصفهان و تعیین مناسب‌ترین روش با توجه به تعداد

(Radial Basis Functions) و (Global Polynomial) GPI) انجام داده و RBF را بهترین روش برای این پهنه‌بندی معرفی نمودند. تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۳) در مطالعه خود روش‌های زمین‌آمار را یکی از پیشرفته‌ترین تکنیک‌ها برای میان‌یابی کیفیت آب زیرزمینی، که مهم‌ترین منبع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود، معرفی نمودند. آنها روش‌های IDW، کریجینگ و کوکریجینگ را به‌منظور پیش‌بینی پراکنش مکانی بعضی خصوصیات آب زیرزمینی مانند کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، میزان یون کلرید و سولفات ۷۳ چاه واقع در دشت یزد - اردکان به‌کار بردند. همچنین پس از نرمال‌سازی داده‌ها، ترسیم واریوگرام‌ها، تعیین بهترین مدل برازش برای داده‌ها و پس از محاسبه خطای جذر میانگین مربعات (Root Mean Square Error, RMSE) روشی را که دارای کمترین میزان خطا بود، انتخاب نمودند.

براساس نتایج حاصله از مطالعه آنها، روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ بر روش IDW ارجحیت داشتند. نش (۲۰) توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی را با استفاده از روش‌های زمین‌آمار مورد بررسی قرار داد. وی با مقایسه خطای حاصل از مدل‌های مختلف واریوگرام در رابطه با میان‌یابی پارامترهای شیمیایی آب، کریجینگ معمولی را بهترین روش برای میان‌یابی معرفی نمود. وی همچنین مدل درجه دوم منطقی را بهترین مدل برای برازش داده‌های هدایت الکتریکی در منطقه خود دانست. هوشمند و همکاران (۱۸) به‌منظور بررسی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی (نسبت جذب سدیم و یون کلرید) استان آذربایجان غربی از روش‌های زمین‌آمار استفاده نمودند. آنها میان‌یابی پارامترها را با استفاده از دو تکنیک کریجینگ و کوکریجینگ انجام داده و پس از مقایسه نتایج حاصل از آنالیز آمارهای توصیفی و دقت هرکدام از روش‌های بالا به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ با اختلاف جزئی در میزان RMSE مناسب‌تر از روش کریجینگ تشخیص داده شد. همچنین در بین مدل‌های واریوگرامی تکنیک کوکریجینگ



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و چاه‌های مورد مطالعه در استان اصفهان

ماربر، مرغاب و حنا و آب‌های زیرزمینی یعنی چاه‌های عمیق و نیمه عمیق، چشمه‌ها و قنات‌ها، تأمین می‌شود. کل آب قابل بهره‌برداری از این منابع، ۷۲۲۵ میلیون مترمکعب است که حدود ۹۰ درصد آن برای کشاورزی و بقیه آن برای آشامیدن، فضای سبز و صنایع مصرف می‌شود (۱۲).

پهنه‌بندی شوری و قلیائیت آب زیرزمینی

به‌منظور ارزیابی و بررسی پارامترهای شیمیایی آب‌های زیرزمینی (Electrical Conductivity, EC و Sodium Adsorption Ratio, SAR) استان اصفهان، از آمار و داده‌های ۵۴۰ حلقه چاه اخذ شده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اصفهان استفاده شده است (شکل ۱) (۵). این چاه‌ها در حوزه‌های آبخیز کارون، دز، کویرسیاه کوه، مرکزی، گاوخونی و دق‌سرخ پراکنده‌اند. کیفیت آب زیرزمینی از جنبه آبیاری محصولات کشاورزی با استفاده از دیاگرام ویل کاکس مورد بررسی قرار گرفت. در این نمودار دو شاخص هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) با توجه به میزان تأثیری که بر محصولات و خاک کشاورزی دارد، به چهار گروه تقسیم و ۱۶ کلاس کیفیت آب از تلفیق این کلاس‌های حاصل شده است که تناسب آب را برای استفاده آبیاری تعیین می‌کند (۱۰).

نمونه‌ها و پراکنش مکانی آنها، (۲) پهنه‌بندی پارامترهای کیفی EC و SAR منابع آب زیرزمینی در سطح استان و (۳) پهنه‌بندی کیفیت منابع آبی زیرزمینی استان از جنبه کشاورزی و آبیاری به‌کمک روش ویل کاکس.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۴۵ کیلومتر مربع، بین ۳۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی در بخش مرکزی ایران واقع شده است. این استان از شمال به استان‌های مرکزی، قم و سمنان، از جنوب به استان‌های فارس و کهگیلویه و بویراحمد، از مشرق به استان‌های یزد و خراسان و از غرب به استان‌های لرستان و چهارمحال و بختیاری محدود می‌شود (شکل ۱). اقلیم استان اصفهان براساس روش تورنت وایت در ۵۸/۷۳ درصد از سطح استان خشک (مناطق شرقی و مرکزی استان)، در ۲۸ درصد نیمه خشک و در ۱۳/۲۷ درصد نیز نیمه مرطوب و مرطوب است (۱۳). متوسط بارش سالیانه آن ۱۶۰ میلی‌متر و پتانسیل تبخیر ۲۴۴۰ میلی‌متر در سال است. آب استان از طریق منابع آب‌های سطحی، مثل رودهای زاینده‌رود،

جدول ۱. مبنای طبقه‌بندی کیفیت آب به روش ویل کاکس (۱۰)

نسبت جذب سدیم		هدایت الکتریکی	
SAR	کلاس	EC(μmhos/cm)	کلاس
۰ - ۱۰	S1	۲۵۰ - ۷۵۰	C1
۱۰ - ۱۸	S2	۷۵۰ - ۲۲۵۰	C2
۱۸ - ۲۶	S3	۲۲۵۰ - ۴۰۰۰	C3
۲۶ - ۳۲	S4	۴۰۰۰ - ۸۰۰۰	C4

جدول ۲. کلاس‌های کیفیت آب به روش ویل کاکس (۱۰)

میزان هدایت الکتریکی				
C4	C3	C2	C1	
C4S1	C3S1***	C2S1**	C1S1*	S1
C4S2	C3S2***	C2S2**	C1S2**	S2
C4S3	C3S3***	C2S3***	C1S3***	S3
C4S4	C3S4	C2S4	C1S4	S4

*: آب‌های خیلی خوب ** : آب‌های خوب ***: آب‌های متوسط بقیه کلاس‌ها: نامناسب

دارای کمترین خطای ریشه میانگین مربعات (RMSe) و بیشترین ضریب همبستگی (R) بین داده‌های موجود و داده‌های تخمینی بود، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. پس از تهیه لایه‌های پهنه‌بندی دو شاخص EC و SAR به‌منظور تعیین کلاس کیفی آب برای کشاورزی از دیاگرام و طبقه‌بندی ویل کاکس استفاده شد. اساس این طبقه‌بندی در جدول ۱ و تعیین کلاس کیفی آب در جدول ۲ آمده است.

در تهیه نقشه کلاس کیفیت در مورد نمونه‌هایی که مقادیر EC و SAR بسیار بالاتر از دامنه طبقه‌بندی بود، دو کلاس C5 و S5 در نظر گرفته شده است، که عبارت از آب‌هایی است که برای کشت هیچ نوع گیاهی (به‌استثناء گیاهان شور پسند کویری) مناسب نیستند. کلاس C5 با هدایت الکتریکی بیش از ۸۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و کلاس S5 نسبت جذب سدیم بیش از ۳۲ را پوشش می‌دهد. نقشه کلاس‌های کیفی آب زیرزمینی به روش ویل کاکس از تلفیق دو نقشه طبقه‌بندی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم تهیه و به‌منظور مکان‌یابی مناطق با کیفیت آب زیرزمینی خوب تا نامناسب و

پس از آزمون روش‌های مختلف زمین‌آمار از جمله کریجینگ، IDW و RBF و مقایسه میزان خطای حاصل، پهنه‌بندی کیفی آب و ایجاد سطحی پیوسته از دو شاخص مذکور، با استفاده از روش کریجینگ ساده برای هدایت الکتریکی و کریجینگ معمولی برای نسبت جذب سدیم که دارای کمترین خطا بودند، انجام یافت. بدین منظور از داده‌های شیمیایی ۵۴۰ حلقه چاه موجود در سطح استان، در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 و با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار الحاقی آنالیز زمین‌آمار (Geostatistical Analyst) استفاده گردید. جهت اعمال روش‌های زمین‌آمار، در گام اول توزیع داده‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت و شاخص‌های آماری آن از قبیل حداکثر، حداقل، میانگین، میانه، چولگی، کشیدگی، انحراف معیار و ضریب تغییرات تعیین شد. در صورت عدم تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال، نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از روش‌های لگاریتمی انجام گرفت. سپس با توجه به میزان خطاهایی که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد، مدل واریوگرامی بر داده‌ها برآزش داده شده (مانند مدل دایره‌ای، کروی و گوسی) و مدلی که

جدول ۳. آمارهای توصیفی دو پارامتر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم قبل از نرمال سازی

متغیر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	میانه	چارک اول	چارک سوم
هدایت الکتریکی ($\mu\text{mhos/cm}$)	۲۱۸/۶	۱۷۸۵۵/۷	۲۷۹۱/۸	۳۱۸۹/۶	۱/۸۳	۶	۱۴۶۸/۲	۵۹۴/۱	۳۸۶۶/۲
نسبت جذب سدیم	۰/۱	۴۶/۱	۵/۵	۵/۹	۲/۵	۱۲/۳	۳/۹	۱/۴	۷/۵

جدول ۴. آمارهای توصیفی دو پارامتر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم پس از نرمال سازی به روش لگاریتمی

متغیر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	میانه	چارک اول	چارک سوم
هدایت الکتریکی	۵/۴	۹/۷	۷/۳	۱/۱	۰/۲	۱/۹	۷/۳	۶/۴	۸/۳
نسبت جذب سدیم	-۲/۵	۳/۸	۱/۰۱	۱/۴	-۰/۸	۲/۹	۱/۴	۰/۳	۲/۰۲

غیرقابل استفاده طبقه بندی گردید.

نتایج

آمار توصیفی دو پارامتر شیمیایی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در حالت معمول در جدول ۳ ارائه شده است. برطبق این جدول میانگین و میانه در هر دو پارامتر با هم متفاوت بوده و میزان کشیدگی و چولگی زیاد است. لذا توزیع فراوانی غیر نرمال می باشد. از آنجا که شرط اعمال روش های میان یابی نرمال بودن داده هاست، لذا با استفاده از روش لگاریتمی داده های مورد استفاده نرمال سازی شدند. آمار توصیفی داده ها پس از نرمال سازی در جدول ۴ نشان داده شده است. پس از نرمال سازی، عمل برازش و تعیین مدل واریوگرامی با استفاده از نرم افزار Geostatistical Analyst انجام شد. برای میان یابی پارامترهای نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی از چهار روش معکوس فاصله، تابع شعاعی، کریجینگ معمولی (Ordinary kriging) و کریجینگ ساده (Simple kriging) استفاده شده است. هم چنین مدل های واریوگرامی دایره ای، کروی، نمایی و گوسی در روش های کریجینگ اعمال شد. مشخصات واریوگرامی در برازش مدل های مختلف برای هر دو پارامتر در جدول ۵ آمده است. در

این جدول واریانس قطعه ای (مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات)، آستانه (مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تأثیر به آن می رسد، خطای ریشه میانگین مربعات و ضریب همبستگی بین داده های موجود و داده های تخمینی ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در میان مدل های واریوگرامی مختلف، بهترین مدل، مدلی است که واجد هر دو شرط RMSE کمتر و R بیشتر باشد. لذا در بین روش هایی که بر روی داده های موجود اعمال گردید، علی رغم کمتر بودن میزان RMSE در بعضی مدل ها، کریجینگ ساده با مدل واریوگرامی دایره ای برای پارامتر هدایت الکتریکی و روش کریجینگ معمولی با مدل واریوگرامی دایره ای برای نسبت جذب سدیم، که دارای ضریب همبستگی بالاتر هستند، انتخاب شدند. ضریب همبستگی برای پارامتر هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در مدل واریوگرامی دایره ای برابر ۰/۷۶ و برای پارامتر نسبت جذب سدیم برابر ۰/۶۷ می باشد. بالان ده و احمدی (۱۵) به منظور بررسی تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی دشت چالدران آذربایجان و پراکنش شوری آن، از روش های زمین آمار و به طور خاص از روش کریجینگ استفاده نمودند. برطبق مطالعه آنها، در میان یابی با استفاده از روش کریجینگ همبستگی مناسبی بین داده های موجود و داده های تخمین زده شده وجود داشت. ضریب

جدول ۵. شاخص‌های اندازه‌گیری شده در مدل کروی برای پارامترهای EC و SAR پس از نرمال‌سازی

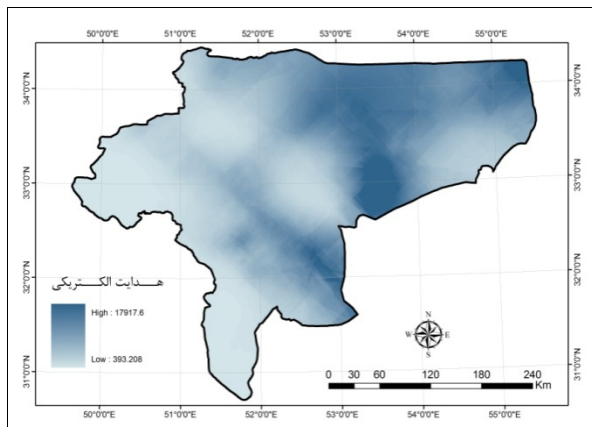
مدل انتخابی	متغیر	واریانس قطعه‌ای (Nugget)	آستانه (Sill)	شعاع تأثیر (Range)	خطای میانگین	خطای میانگین مربعات (RMSe)	خطای ریشه میانگین استاندارد شده	خطای ریشه میانگین مربعات استاندارد شده	ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی
کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging)	کروی	هدایت الکتریکی	۱/۸۶	۵۸۲۲۰۵	۲۰۸/۸	۳۳۳۲	۲۴۴۳۰	۰/۱۴۴	۰/۷۲
	(Spherical)	نسبت جذب سدیم	۴/۱	۵۸۲۲۰۵	۱/۲۹	۴/۴	۴۵۴/۴	۰/۰۱	۰/۶۶
	دایره‌ای	هدایت الکتریکی	۲/۰۷	۵۸۲۲۰۵	۲۲۷/۶	۳۳۴۱	۳۱۰۴۰	۰/۱۱	۰/۷۶
	(Circular)	نسبت جذب سدیم	۴/۷	۵۸۲۲۰۵	۱/۳۵	۴/۴	۸۰۹/۹	۰/۰۰۸	۰/۶۷
	نمایی	هدایت الکتریکی	۱/۸	۵۸۲۲۰۵	۴۴/۷۸	۳۲۰۷	۱۷۰۴۰	۰/۱۹	۰/۷۳
	(Exponential)	نسبت جذب سدیم	۳/۶۳	۵۸۲۲۰۵	۰/۶۷	۴/۰۳	۱۷۷/۳	۰/۰۳	۰/۶۱
	گوسی	هدایت الکتریکی	۰/۹۵	۲۲۶۸۲۲	۲۲۳/۴	۳۴۶۳	۱۱۱۳۰	۰/۳۳	۰/۷۱
	(Gaussian)	نسبت جذب سدیم	۰/۳۳	۴۲۹۰۱۸	۲/۲۴	۵/۲۹	۳۸۵/۴	۰/۰۲	۰/۷۲
	کروی	هدایت الکتریکی	۱/۰۶	۱۰۱۲۶۴	-۶۲/۹۱	۳۱۰۴	۳۲۹۳	۰/۸	۰/۷
	(Spherical)	نسبت جذب سدیم	۱/۷۴	۱۱۰۰۳۳	۱/۲	۴/۳۷	۱۰/۹۱	۰/۵۷	۰/۶۶
	دایره‌ای	هدایت الکتریکی	۱/۰۲	۹۲۳۱۳/۷۷	-۲۲/۰۸	۳۱۱۳	۳۴۵۷	۰/۷۶	۰/۷۶
	(Circular)	نسبت جذب سدیم	۱/۶۶	۱۰۰۴۹۵	۱/۳۹	۴/۵	۱۱/۵۷	۰/۵۲	۰/۶۸
نمایی	هدایت الکتریکی	۱/۵	۸۷۱۳۸/۹	-۸۴/۵۹	۳۰۰۷	۳۴۲۷	۳/۴	۰/۷	
(Exponential)	نسبت جذب سدیم	۲/۴	۹۴۶۹۰/۹	۱	۴/۳۴	۱۳/۱	۳/۸	۰/۶۶	
گوسی	هدایت الکتریکی	۰/۸۹	۸۶۶۸۰/۱	۹/۲۵	۳۱۸۰	۳۶۳۹	۰/۷۸	۰/۷۲	
(Gaussian)	نسبت جذب سدیم	۱/۴۸	۹۳۳۷۳/۲	۱/۵۲	۴/۸	۱۱/۹۳	۰/۵۳	۰/۷۳	
RBF	هدایت الکتریکی			-۱۴۷/۵	۳۲۶۲				۰/۶
	نسبت جذب سدیم			-۰/۱۴	۳/۸۸				۰/۵۸
	هدایت الکتریکی			-۲۳۵/۷	۳۱۶۰				۰/۵۹
	نسبت جذب سدیم			-۰/۲۲	۳/۸۹				۰/۶۳
IDW									

کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging)

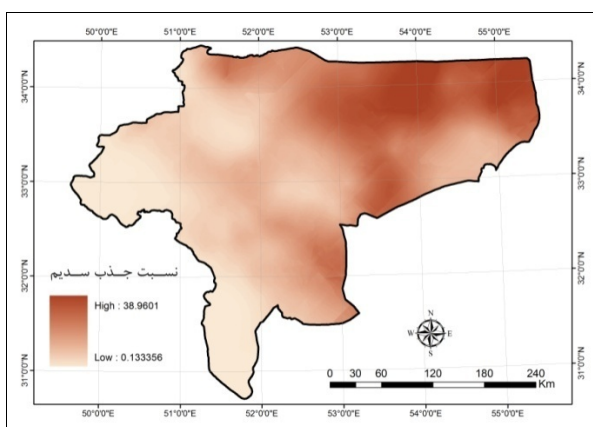
کریجینگ ساده (Simple Kriging)

شهرستان خور و بیابانک و کمترین میزان این شاخص نیز برابر ۰/۱۳ در جنوب و غرب سمیرم برآورد گردیده است. با توجه به دو نقشه مذکور به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که میزان هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم آب زیرزمینی در مناطق کوهستانی و پرباران کمتر از اراضی پست، پلایاها و شورزارهاست. نقشه کلاس‌های مختلف کیفیت آب زیرزمینی از جنبه آبیاری و کشاورزی از تلفیق دو نقشه کلاس‌بندی شده، دو شاخص EC و SAR تهیه شده است (شکل ۴). سطح تحت پوشش هر یک از کلاس‌ها در جدول ۶ آمده است. قابلیت

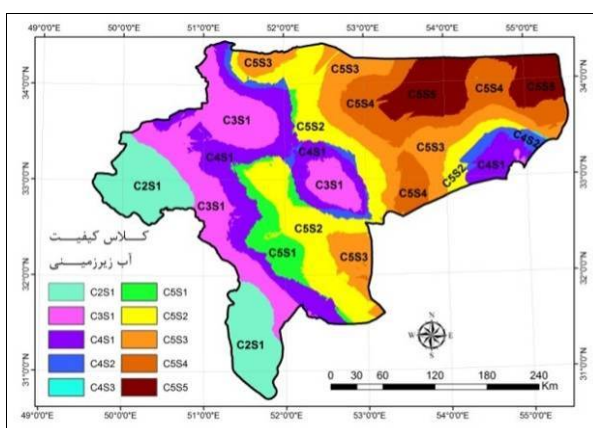
همبستگی بین این مقادیر برای داده‌های سطح آب زیرزمینی برابر ۰/۷۷ و برای داده‌های شوری آب زیرزمینی برابر ۰/۷۹ بود. نقشه حاصل از میان‌یابی پارامتر هدایت الکتریکی در شکل ۲ و نقشه حاصل از میان‌یابی نسبت جذب سدیم در شکل ۳ ارائه شده است. برطبق این نقشه‌ها میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی بین ۳۹۳/۲ میکروموس بر سانتی‌متر در غربی‌ترین مرز استان واقع در فریدن تا ۱۷۹۱۷/۶ میکروموس بر سانتی‌متر در شورزارهای جنوب انارک متغیر است. بیشترین نسبت جذب سدیم برابر ۳۸/۹ در اراضی شور و قلیایی شمال غربی و شمال



شکل ۲. میان‌یابی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی استان اصفهان به روش کریجینگ



شکل ۳. میان‌یابی نسبت جذب سدیم آب زیرزمینی استان اصفهان به روش کریجینگ



شکل ۴. کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی به روش ویل کاکس

بیش از ۷۱ درصد از آب‌های زیرزمینی استان برای آبیاری نامناسب و یا غیرقابل استفاده هستند. این آب‌ها در بخش‌های مرکزی و شرقی استان اصفهان گسترش دارند. آب‌های

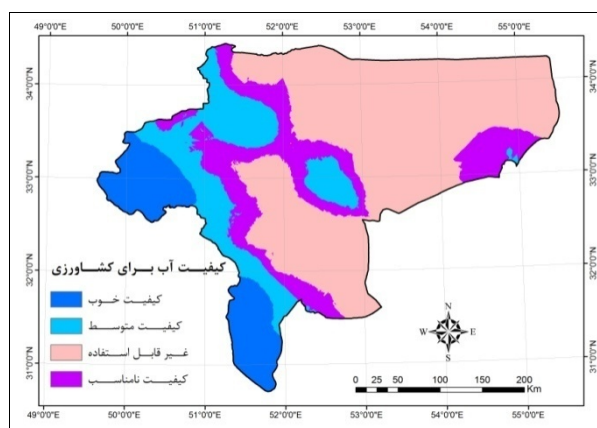
استفاده از آب زیرزمینی برای آبیاری با توجه به کلاس‌های روش ویل کاکس از خوب تا غیرقابل استفاده در جدول ۷ و شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۷،

جدول ۶. مساحت کلاس‌های مختلف کیفیت آب به روش ویل کاکس در سطح استان اصفهان

مساحت (کیلومتر مربع)	کلاس کیفیت آب در روش ویل کاکس	مساحت (کیلومتر مربع)	کلاس کیفیت آب در روش ویل کاکس
۱۷۱۰۹/۳	C3S1	۱۲۹۷۹/۱	C2S1
۸۸۵۹/۶	C5S5	۱۵۵۶۸/۵	C4S1
۱۱۷۰۵/۸	C5S4	۳۱۲۴/۴	C4S2
۴۸۸۹/۹	C5S1	۱۷۷۸۳/۴	C5S2
۱۵۱۸۳/۳	C4S3	۱۴۹۶۹/۳	C5S3

جدول ۷. سطح تحت پوشش هر کلاس قابلیت آب زیرزمینی برای آبیاری

کیفیت آب زیرزمینی مساحت (کیلومتر مربع)	کیفیت خوب	کیفیت متوسط	نامناسب	غیر قابل استفاده
۱۲۹۷۹/۱	۱۷۱۲۰	۱۸۷۲۵	۵۸۱۷۵/۹	



شکل ۵. کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و آبیاری

جهان، ایران و استان اصفهان روند صعودی دارد. به عنوان مثال، بهره‌برداری‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در این استان باعث افت شدید آن در بخش‌های مختلف شده است. طبق بررسی‌های به عمل آمده در تحقیق حاضر آمار افت سطح آب‌های زیرزمینی به ترتیب در زیرحوضه‌های قبر کیخا، مورچه خورت، باد - خالدآباد، اردستان، کاشان و مهیار جنوبی میزان افت سالانه بیش از دیگر زیر حوضه‌ها و بیش از نیم متر بوده است. هم‌چنین با توجه با داده‌های موجود افت برخی از چاه‌ها حدود ۲۴ متر طی ۱۸ سال (۱۳۷۰ - ۱۳۸۸) در شهرستان شهرضا (زیرحوضه مهیار)، ۲۰ متر در شهرستان شاهین‌شهر

با کیفیت متوسط که در حدود ۱۶ درصد آب‌های زیرزمینی استان را تشکیل داده‌اند، بیشتر در اراضی پایکوهی غرب، شمال غرب و جنوب غرب استان و ارتفاعات اطراف شهر نایین پراکنده‌اند. کیفیت آب زیرزمینی از جنبه آبیاری منحصراً در ارتفاعات غرب و جنوب استان (شهرستان سمیرم) در کلاس مناسب قرار می‌گیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه با افزایش جمعیت جهان و نیاز غذایی و از طرف دیگر کاهش اراضی مناسب کشاورزی، فرآیند شور شدن اراضی در

میزان ضریب همبستگی نیز ۰/۷۳ تعیین شد.

بر طبق نتایج تحقیق حاضر، آب زیرزمینی استان اصفهان در مجموع از کیفیت چندان مناسبی برخوردار نیست. هدایت الکتریکی آب زیرزمینی منحصراً در ۱۲/۱۳ درصد از سطح استان که دارای اقلیم نیمه‌خشک تا نیمه مرطوب هستند (ارتفاعات غرب و جنوب استان) مناسب بوده و در کلاس آب‌های خوب قرار می‌گیرد. در حدود ۱۶ درصد از آب‌ها نیز که در مناطق دشتی غرب استان و ارتفاعات ناین و کاشان قرار گرفته‌اند، کیفیت آب از جنبه شوری متوسط است. کیفیت آب‌های دیگر نقاط استان برای آبیاری نامناسب می‌باشد. بیش از نیمی از آب‌های زیرزمینی استان اصفهان دارای هدایت الکتریکی بیش از ۸۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است. آبیاری با آب زیرزمینی شور نه تنها به گیاه آسیب وارد می‌آورد بلکه موجب انتقال شوری آب به سطح خاک، پراکنش ذرات خاک و تجمع نمک در پروفیل خاک می‌گردد. از سوی دیگر کشاورز به منظور جلوگیری از تجمع نمک بر روی گیاه ناچار به استفاده چند برابر آب برای آبیاری می‌شود. این امر به نوبه خود موجب برداشت بیشتر از سفره و افت سطح آب زیرزمینی می‌شود. نسبت جذب سدیم در ۴۷/۲۴ درصد از آب‌های زیرزمینی استان مناسب و کمتر از ۱۰ می‌باشد. میزان این پارامتر تنها در ۱۱ درصد از سطح استان (نیمه شمالی شهرستان خور و بیابانک و هم‌چنین شهرستان ناین) بیش از حد مجاز برای آبیاری است. این بخش مشتمل بر مناطق کویری و غیرقابل دسترسی مانند ریگ جن می‌باشد که به نوعی خالی از سکنه بوده و عملاً کشاورزی در آن صورت نمی‌گیرد. لذا در کل می‌توان ادعا داشت که مشکل اصلی کیفیت آب آبیاری در سطح استان از شوری آب نشأت می‌گیرد. با توجه به نقشه‌های پارامترهای شیمیایی، شوری آب در مناطقی که اقلیم خشک (بارش کم و تبخیر بالا) است، بیشتر است. بخش اعظم شوری و قلیائیت آب زیرزمینی تحت تأثیر سازندهای تبخیری و انحلال‌پذیر دوره کوتاه‌تر ایجاد می‌شود. بنابراین بیشترین شوری آب زیرزمینی در پلایاهای مناطق بیابانی که سطح آب بالا بوده

(زیرحوزه مورچه خورت) می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج حاصل باید از بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی که منجر به افزایش شوری آب و خاک، مرگ تدریجی اراضی، نشست زمین و پدیدار شدن چهره بیابان در مناطق غیر بیابانی استان می‌شود ممانعت به عمل آید.

نتایج پهنه‌بندی مطالعه حاضر نشان داد که بهترین روش میان‌یابی که هم دارای میزان خطای RMSe کمتر و هم ضریب همبستگی بیشتر است، روش کریجینگ با مدل واریوگرامی دایره‌ای است. مطالعات دیگری که در این زمینه صورت گرفته است، نتایج مختلفی ارائه کرده‌اند، ولی در کلیه این روش‌ها بهترین روش میان‌یابی کریجینگ معرفی شده است و تنها تفاوت موجود در ارتباط با مدل‌های واریوگرامی برآزش یافته روی داده‌هاست. تفاوت در این مدل‌ها به تعداد داده‌ها و پراکنش مکانی آن‌ها بسیار وابسته است (۶، ۸، ۲۱ و ۲۲). رضایی و همکاران (۳) با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، کیفیت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده برنج‌کاران در استان گیلان را مورد بررسی قرار دادند. ایشان تغییرات مکانی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه را با استفاده از میان‌یابی داده‌های سه شاخص کیفیت آب مشتمل بر EC، Na و SAR در ۱۳۵ حلقه چاه پراکنده در سطح استان گیلان مطالعه نمودند. براساس مطالعات ایشان مدل کروی در بین دیگر مدل‌ها، بهترین مدل برای برآزش واریوگرام می‌باشد. هم‌چنین کیفیت آب‌های زیرزمینی از جنبه میزان SAR مناسب تعیین شد. اما از نظر هدایت الکتریکی کیفیت آب در مناطق مرکزی و مرکزی متمایل به شرق پایین بوده و در آینده می‌تواند تهدیدی برای تولید برنج باشد (۳). شعبانی (۷) با هدف بررسی و تحلیل مکانی میزان شوری و نترات آب‌های زیرزمینی دشت نی‌ریز فارس، روش‌های مختلف زمین‌آمار مانند کریجینگ، عکس فاصله، تابع شعاعی، تخمین‌گر موضعی و عام را مورد ارزیابی قرار داد. براساس نتایج تحقیق مذکور دو روش تابع شعاعی (RBF) و روش کریجینگ ساده مناسب‌ترین روش‌ها بودند. میزان خطای RMSE برای هدایت الکتریکی در این تحقیق ۳۰۹۷/۵۲ و

یافته و بقیه منطقه مشتمل بر پلایاها، دشت‌های ریگی و دیگر رخساره‌های بیابانی می‌باشد که فاقد کاربری کشاورزی است. همان‌طوری که مشخص است پهنه‌بندی‌های صورت گرفته در این تحقیق در مقیاس استانی بوده و گویای یک تصویر کلی از وضعیت کیفیت آب زیرزمینی استان اصفهان می‌باشد. اگرچه نمی‌توان از نقشه‌های تولیدی در مقیاس‌های تفصیلی بهره گرفت، اما چنین نقشه‌هایی با قابلیت توزیع مکانی پیوسته می‌توانند در برنامه‌ریزی‌ها، اقدامات مدیریتی، آمایش سرزمین و توسعه پایدار در سطح کلان استان بسیار سودمند باشند.

سپاسگزاری

مقاله حاضر با تکیه بر بخشی از مطالعات صورت گرفته در طرح جامع مدیریت بحران استان اصفهان تهیه گردیده است. لذا بدین وسیله از همکاری و مساعدت مجری اصلی طرح و مدیر کل محترم ستاد مدیریت بحران استان اصفهان تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اصفهان به جهت ارائه داده و اطلاعات کمال تشکر را داریم.

و میزان تبخیر چند برابر بارش است، به چشم می‌خورد. ابراهیمی و همکاران (۱) منابع آب زیرزمینی دشت سگزی اصفهان را با استفاده از گراف‌های شولر، ویل کاکس و پایپر مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج ایشان قسمت اعظم آب در کلاس C3S2 (شوری زیاد و سدیمی متوسط) قرار می‌گیرد. مطابق نتایجی که از مقایسه نقشه کیفیت آب‌های زیرزمینی با نقشه کاربری استان (۱۱) به دست آمده است، در حدود ۲۷۵۷ کیلومتر مربع از اراضی کشاورزی استان در محدوده‌ای قرار گرفته است که براساس طبقه‌بندی ویل کاکس آب زیرزمینی نامناسب و غیرقابل استفاده برای کشاورزی دارند. این اراضی بخش وسیعی از اراضی کشاورزی استان را در مناطق مرکزی و شرق استان را در برمی‌گیرد. آبیاری با این آب‌ها در این مناطق موجب انتقال شوری آب به سطح زمین و شور شدن خاک کشاورزی شده است. به نحوی که آثار شوری به وضوح بر روی سطح خاک و یقه محصولات کشاورزی قابل مشاهده است. بر طبق نقشه‌های مذکور تنها ۳/۵ درصد از سطح اراضی که دارای آب‌های غیرقابل استفاده هستند، به کاربری کشاورزی اختصاص

منابع مورد استفاده

۱. ابراهیمی، خ.، م. جنت رستمی، م. جعفری و ق. رستمی. ۱۳۸۸. بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت سگزی، مجموعه مقالات همایش ملی بحران آب در کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد شهر ری.
۲. حقیقت، ر. و ی. محمدی. ۱۳۸۴. چگونگی وضعیت آلودگی منابع آب در منطقه رامسر. پژوهش در پزشکی ۲۹(۴): ۳۶۵-۳۷۱.
۳. رضایی، م.، ن. دواتگر، خ. تاجداری و ب. ابولپور. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مکانی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی استان گیلان با استفاده از زمین آمار. نشریه آب و خاک ۲۴: ۹۴۱-۹۳۲.
۴. زهتابیان، غ.، ع. رفیعی امام، ک. علوی پناه و م. جعفری. ۱۳۸۳. بررسی آب زیرزمینی دشت ورامین جهت استفاده از آبیاری اراضی کشاورزی. پژوهش‌های جغرافیایی ۴۸: ۱۰۲-۹۱.
۵. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اصفهان. ۱۳۸۹. آمار کیفی (پارامترهای شیمیایی) و کمی (سطح سفره) آب زیرزمینی. لوح فشرده. اصفهان.
۶. شعبانی، م. ۱۳۸۹. تعیین مناسب‌ترین روش زمین آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارسنجان)، مجله مهندسی آب. ۱: ۵۷-۴۷.
۷. شعبانی، م. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در تهیه نقشه‌های کیفی آب زیرزمینی و پهنه‌بندی آنها، مطالعه موردی: دشت نی‌ریز استان فارس. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی لار ۱۳: ۹۶-۸۳.

۸. طباطبایی، ح. و م. غزالی. ۱۳۹۰. ارزیابی دقت روش‌های میان‌بابی در تخمین سطح ایستابی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان‌های فارسان- جوتقان و سفید دشت). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۵۷: ۲۲-۱۱.
۹. عسکری، م. ا. مساعدی، ا. ا. دهقانی و م. مفتاح هلقی. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی به‌وسیله تحلیل‌های آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی دشت قزوین. مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین‌المللی منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۱۰. علیزاده، ا. ۱۳۷۶. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات آستان قدس رضوی. مشهد.
۱۱. واحد آبخیزداری سازمان تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کشور. ۱۳۸۳. نقشه کاربری اراضی استان اصفهان. لوح فشرده.
۱۲. وزارت مسکن و شهرسازی. ۱۳۸۱. طرح توسعه و عمران (جامع) ناحیه اصفهان.
۱۳. یوسفی، ص.، س. میرزایی، ش. توانگر و م. نوروزی. ۱۳۹۰. پهنه‌بندی اقلیمی استان اصفهان با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). مجموعه مقالات هجدهمین همایش ژئوماتیک ۹۰، سازمان نقشه‌برداری ایران، تهران.
14. Amiraslani, F. and D. Dragovich. 2011. Combating desertification in Iran over the last 50 years: An overview of changing approaches, *J. Environ. Manage.* 92:1-13.
15. Balandeh, N. and A. Ahmadi. 2013. Zoning of the groundwater-level and salinity using geostatistic. *Intl. J. Agric. Res. and Rev.* 3(1): 109-112.
16. D'Odorico P., A. Bhattachan, K.F. Davis, S. Ravi and C. Runyan. 2012. Global desertification: Drivers and feedbacks. *Adv. in Water Resour.* 51: 326-344.
17. Giti, A., N. Mashhadi, A. Farshi and A. Torabi. 1999. Studying salinization trends of underground water resources in the northern plain of Kashan. *BIABAN.* 4:1-24.
18. Hooshmand, A., M. Delghandi, A. Izadi and K.H.A. Aali. 2011. Application of kriging and cokriging in spatial estimation of groundwater quality parameters, *Afr. J. Agric. Res.* 6(14): 3402-3408.
19. Masoudi, M., G.H. R. Zehtabiyani, R. Noruzi, M. Mahdavi and S.B. Kuhenjani. 2009. Hazard assessment of groundwater resource degradation using GIS in Mond Miyani Basin, Iran, *World Appl. Sci. J.* 6(6): 802-807.
20. Nas, B., (2009), Geostatistical approach to assessment of spatial distribution of groundwater quality. *Polish J. Environ. Stud.* 18(6): 1073-1082.
21. Samson, M., G. Swaminathan and N. Venkat Kumar. 2010. Assessing groundwater quality for potability using a fuzzy logic and GIS- A case study for Tiruchirappalli City- India. *Comp. Model. and New Technols.* 14(2):58-68.
22. Sarukkalige, R., 2012. Geostatistical analysis of groundwater quality in Western Australia. *Eng. Sci. and Technol. An Intl. J.* 2(4): 790-794.
23. Taghizadeh Mehrjerdi, R., M. Zareian Jahromi, Sh. Mahmodi and A. Heidari. 2008. Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (Case Study: Yazd-Ardakan Plain). *World Appl. Sci. J.* 4(1): 9-17.