هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۶، بهار ۱۳۹۵، صص ۳۲-۱۷
وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۱ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۸

تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه‌ی نقشه‌ی تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی (مطالعه‌ی موردی: دشت شیرامین، استان آذربایجان شرقی)

خلیل ولیزاده کامران[۱]
شهرام روستایی[۲]
توحید رحیم‌پور[*۳]
مهسا نخستین روحی[۴]

چکیده

در سرتاسر دنیا و از جمله کشور ایران، آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منابع تأمین آب مورد نیاز می‌باشند. تعیین کیفیت آب در مدیریت منابع از اهمیت خاصی برخوردار بوده و پایش آن به عنوان یک اصل مهم در برنامه‌ریزی‌ها باید مد نظر قرار گیرد. هدف از انجام این تحقیق، تعیین مناسب‌ترین روش درون‌یابی به منظور تحلیل مکانی تغییرات هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذبی سدیم (SAR) آب‌های زیرزمینی دشت شیرامین واقع در استان آذربایجان شرقی می‌باشد. اطلاعات مربوطه از تجزیه و تحلیل نمونه‌های مربوط به ۳۰ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق در منطقه‌ی مورد مطالعه و بر اساس آخرین نمونه‌گیری سال ۱۳۹۰ توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی به‌دست آمده‌اند. جهت انجام کار از روش‌های زمین‌آمار مانند کریجینگ ساده (SK)، کریجینگ معمولی (OK)، کریجینگ گسسته و کوکریجینگ استفاده شد. برای بررسی همبستگی مکانی داده‌ها، واریوگرام‌های تجربی هر یک از متغیرها و واریوگرام متقابل آن‌ها، محاسبه و ترسیم شدند. ضریب همبستگی دو متغیر، بر اساس واریوگرام متقابل آن‌ها، ۰/۹۳محاسبه شد. برای هر دو پارامتر EC و SAR مدل کروی بر مبنای حداقل مقدار RSS به عنوان مناسب ترین مدل برازش داده شد. برای ارزیابی روش‌ها از روش ارزیابی متقابل با معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و همچنین ضریب همبستگی (R) بین مقادیر مشاهده شده و تخمینی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که روش کریجینگ ساده به دلیل R بالاتر و RMSE پایین‌تر نسبت به سایر روش‌ها جهت تهیه نقشه تغییرات EC و SAR در منطقه مناسب‌ترین روش می‌باشد.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، زمین‌آمار، EC، SAR، دشت شیرامین.

۱- استادیار دانشگاه تبریز.
۲- استاد دانشگاه تبریز.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول). Email: rahimpour1990@gmail.com
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز.

مقدمه

امروزه کیفیت منابع آبی در سراسر جهان به ویژه در کشورهای جهان سوم به دلیل فرآیندهای طبیعی و انسانی در حال کاهش است و منابع آب شیرین به وسیله‌ی پدیده‌ی شوری تهدید می‌شوند (لی و ژانگ[1]، ۲۰۰۸: ۳۵). تخلیه‌ی فاضلاب‌های شهری، روانآب، دامداری‌های بزرگ، فاضلاب کارخانه‌ها، مکان دفع فاضلاب به عنوان عواملی هستند که بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیرات بسیار منفی می‌گذارند (دورقام[2] و همکاران، ۲۰۰۴: ۳۱؛ لوکاسن[3] و همکاران، ۲۰۰۴: ۲۵۶). افزایش بی‌رویه‌ی جمعیت، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور در سال‌های گذشته شده است. علاوه بر افت شدید سطح آب در آبخوان‌ها، فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها تحمیل می‌کنند که برای جلوگیری از ادامه‌ی افت کمی و کیفی، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به‌عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. محدود بودن این منابع زیرزمینی و استفاده‌ی بیش از حد از آن‌ها در ایران به خصوص در مناطق کویری، مشکلاتی را برای سلامتی انسان‌ها به وجود آورده است؛ بنابراین، تعیین مشخصات کیفی آب‌های زیرزمینی (ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی) که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن برای مصرف مورد نظر خواهد بود، ضروری است (صداقت، ۱۳۹۲: ۲۸). کیفیت آب زیرزمینی به‌اندازه کمیت آن برای قابل استفاده بودن آن در مصارف مختلف، مهم و ضروری است. تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی و شور شدن منابع آب در حال حاضر خطری بزرگ در راه توسعه‌ی کشاورزی کشور به خصوص در اراضی خشک می‌باشد. لذا با توجه به اهمیت موضوع و نقش مهم منابع آب زیرزمینی در فعالیت‌های انسانی، تحلیل مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران بوده است. روش‌های مختلفی برای تحلیل مکانی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی بر اساس داده‌های نقطه‌ای حاصل از چاه‌های پیزومتری وجود دارد. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش‌های زمین آمار[4] اشاره نمود.

روش‌های زمین آمار برای متغیرهایی که دارای ساختار مکانی هستند کارایی مناسبی دارند. به عبارت دیگر زمین آمار را می‌توان کاربرد روش‌های مبتنی بر آمار در مورد متغیرهای ناحیه‌ای تعریف کرد، که

1- Li and Zhang
2- Dorgham
3- Lucassen
4- Geostatistic

می‌تواند به بررسی عدم قطعیت‌ها در محیط بپردازد. تاریخچه کاربرد این روش‌ها را می‌توان در هواشناسی، منابع آب، محیط زیست، کشاورزی و علوم خاک پیدا کرد.

آگاهی از وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی و پایش تغییرات پارامترهای کیفی و کنترل آن‌ها یکی از نیازهای مدیریتی بوده و بسیار حائز اهمیت می‌باشد. روش‌های زمین آمار به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها از جمله روش‌های مناسب پهنه‌بندی تغییرات کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشند. در زمین آمار ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار مکانی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد. البته ممکن است نمونه‌های مجاور با فاصله‌ی معینی در قالب ساختار مکانی به هم وابسته باشند، در این حالت بدیهی است که میزان تشابه بین مقادیر مربوط به نمونه‌های نزدیکتر بیشتر است، زیرا در صورت وجود ساختار مکانی، تغییرات ایجاد شده در یک فضای معین شانس بیشتری برای تأثیرگذاری روی فضاهای نزدیک به خود را نسبت به فضاهای دورتر از خود دارند (لشنی‌زند، ۱۳۸۱: ۸۲). انتخاب روش درون‌یابی به نوع متغیر و تغییرات آن بستگی دارد و باید به این نکته توجه شود که برای حالات مختلف هیچ‌گاه استفاده از یک مدل بهینه پیشنهاد نمی‌شود، زیرا که یک مدل خاص در شرایط مختلف نتایج متفاوتی به دنبال دارد.

در رابطه با پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین آمار در ایران مطالعات با ارزشی صورت گرفته است. برای مثال، شعبانی (۱۳۸۷)، در تحقیقی به تحلیل مکانی اسیدیته (PH) و کل مواد جامد محلول (TDS[1]) در آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان واقع در شمال شرقی استان فارس پرداخت. در این تحقیق روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و روش‌های معین مانند عکس فاصله، تابع شعاعی، تخمین‌گر موضعی و تخمین‌گر عام با هم مقایسه شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش کریجینگ معمولی برای میان‌یابی PH و TDS مناسب‌ترین روش زمین‌آماری می‌باشد. کرمی و کاظمی (۱۳۹۱)، به پایش مکانی شوری آب‌های زیرزمینی در مواقع خشک‌سالی و ترسالی در دشت تبریز پرداختند. برای این منظور از متغیرهای اقلیمی شامل بارش‌های ماهانه (۸۶-۱۳۵۱) و نتایج تجزیه شیمیایی آب‌های زیرزمینی به‌ویژه شاخص‌های هدایت الکتریکی (EC)[2]، نسبت جذب سدیم (SAR)[3] و TDS استفاده کردند، در نهایت نقشه‌های هم‌ارزش EC و SAR آب‌های زیرزمینی در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی GIS[4] ترسیم شدند.

1- Total Dissolve Solid (TDS)
2- Electrical Conductivity (EC)
3- Sodium Absorption Ratio
4- Geographic Information System (GIS)

نتایج نشان داد که میزان آب‌های زیرزمینی شور و خیلی شور در سال شاخص خشکسالی ۲۸/۲ درصد و آب‌های زیرزمینی با قلیاییت زیاد ۲۵/۳۵ درصد بوده در حالی که در سال شاخص ترسالی آب‌های زیرزمینی شور و خیلی شور ۱۸/۱۵ درصد و با قلیاییت ۴/۹۲ درصد آب‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهد. دلبری و همکاران (۱۳۹۲)، در تحقیقی به پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی (شوری و سدیمی) آب با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در دشت کرمان پرداختند. در تحقیق آنها از آمار مربوط به ۷۶ حلقه چاه استفاده شد. روش‌های میان‌یابی استفاده‌شده شامل کریجینگ معمولی و لاگ کریجینگ بوده‌اند. برای ارزیابی روش‌ها از روش ارزیابی متقابل با معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[1] و میانگین قدر مطلق خطا (MAE)[2] استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی متقابل نشان داد که هر دو روش کریجینگ معمولی و لاگ کریجینگ از دقت مشابهی برای تخمین شاخص‌های شوری و سدیمی برخوردارند. صالحی و زینی‌وند (۱۳۹۳)، در تحقیقی با انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی به بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای شرب و کشاورزی در غرب شهرستان مریوان پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که از بین روش‌های مختلف درون‌یابی، روش تخمین‌گر موضعی برای پارامترهای سولفات، غلظت مواد محلول و شوری؛ روش تابع شعاعی برای پارامترهای سدیم و نسبت جذب سدیم؛ روش تخمین‌گر عام برای پارامتر کلر و روش کریجینگ ساده برای پارامتر سختی آب، مناسب‌ترین برآورد سالانه را دارند.

در خارج از کشور نیز تحقیقات مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. از جمله، کیوسی[3] و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی و تحلیل تغییرات مکانی نیترات و شوری آب زیرزمینی حوضه‌ی عمان زرگا با استفاده از کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که مقادیر نیترات در ۷۳ درصد از منطقه‌ی مورد مطالعه بیشتر از ۵۰ میلی گرم در لیتر می باشد. یوان و کی[4] (۲۰۱۰)، با استفاده از زمین‌آمار نقشه‌ی پراکندگی نیترات با استفاده از داده‌های ۱۱۹ حلقه چاه آب زیرزمینی شهر قونیه واقع در کشور ترکیه را ارائه و ضمن تأئید صحت مدل واریوگرام کروی، بیشترین آلودگی را در مرکز شهر به دلیل وجود نیترات در فاضلاب مشاهده کردند. آرسلان[5] (۲۰۱۲)، در تحقیقی تغییرات مکانی و زمانی شوری آب زیرزمینی دشت بارفا واقع در شمال کشور ترکیه را بر اساس داده‌های ۹۷ حلقه چاه در یک دوره‌ی ۷ ساله با روش کریجینگ مورد مطالعه قرار داد. نقشه‌های تغییرات شوری نشان داد که شوری آب زیرزمینی در سال ۲۰۰۴ با مقدار

1- Root Mean Square Error
2- Mean Absolute Error (MAE)
3- Kuisi
4- Uyan and Cay
5- Arslan

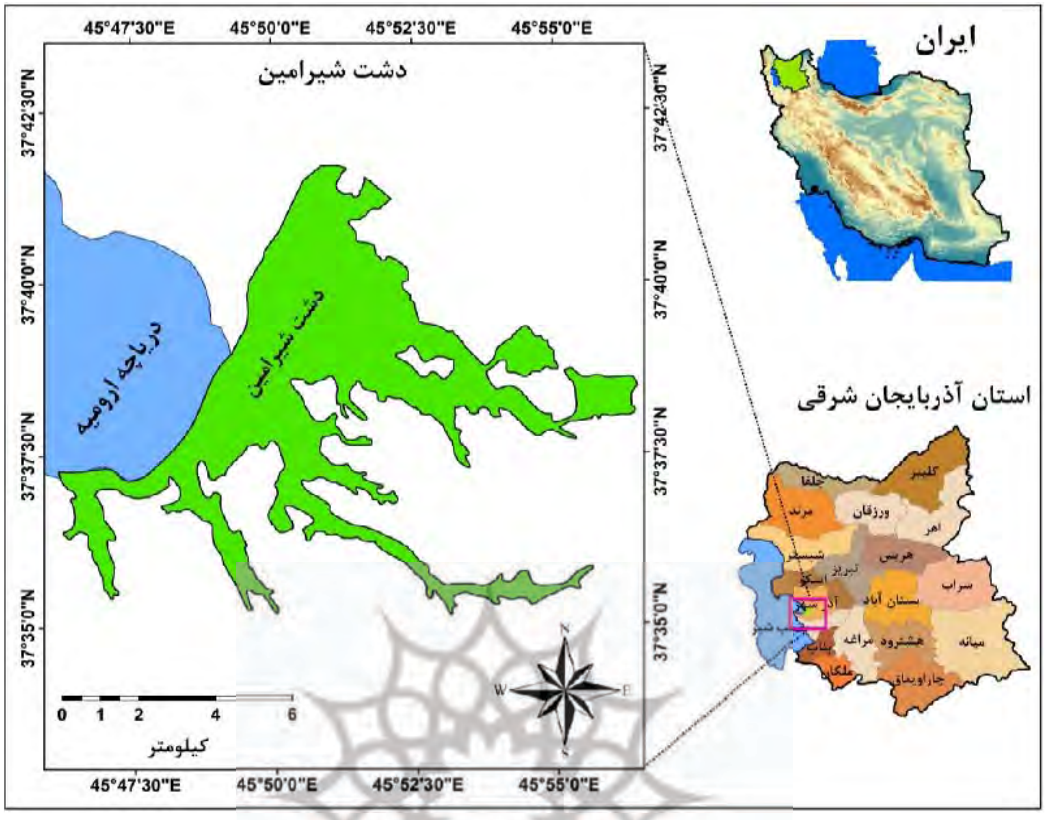
بیش از ds/m5 در ۳۱ درصد مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه، در سال ۲۰۱۰، به ۹ درصد مساحت منطقه کاهش یافته است. گورای و کومار[1] (۲۰۱۳)، توزیع مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی رانچی مانسیپال کورپوریشن را بررسی کردند. در تحقیق ایشان از داده‌های ۶۵ حلقه چاه استفاده شد. مدل‌های برازش یافته بر اساس ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای استاندارد (ASE)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطای استاندارد (RMSSE)، خطای متوسط (ME) و میانگین مربعات خطا (MSE) ارزیابی شدند که در نهایت نقشه‌های توزیع مکانی بر اساس این مدل‌ها در محیط GIS ترسیم شدند.

هدف تحقیق حاضر، سنجش دقت روش‌های مختلف زمین آماری در برآورد منطقه‌ای تغییرات شوری آب-های زیرزمینی در دشت شیرامین می‌باشد. برای انجام درون‌یابی‌ها در این تحقیق از روش‌های روش کریجینگ (ساده، معمولی، گسسته و کوکریجینگ) استفاد شده و در نهایت ارزیابی خطای روش‌ها به منظور انتخاب دقیق‌ترین روش صورت گرفت.

معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت شیرامین با وسعتی در حدود ۴۷ کیلومترمربع در قسمت جنوب غربی شهر آذرشهر و شمال غربی شهر عجب‌شیر و قسمت شرق دریاچه ارومیه واقع گشته است. از نظر موقعیت جغرافیایی بین ″۳۵، ′۴۰ و °۴۵ تا ″۱۰، ′۰۲ و °۴۶ طول شرقی و ″۵۰ ، ′۲۸ و °۳۷ تا ″۴۰، ′۴۱ و °۳۷ عرض شمالی واقع شده است. بر پایه گزارش‌های هواشناسی، متوسط بارندگی سالانه از ۶۰۰-۳۰۰ میلی‌متر در سال متغیر است و بیشترین بارش مربوط به ماه‌های اسفند و اردیبهشت می‌باشد. حداکثر ارتفاع دشت ۱۶۹۰ متر و حداقل ارتفاع در نزدیکی خطوط ساحلی برابر ۱۲۶۶ متر از سطح دریا می‌باشد. آب آشامیدنی و آبیاری منطقه به طور عمده از آب‌های زیرزمینی (چاه‌ها و قنوات) تأمین می‌شود اما در سال‌های اخیر به علت خشکسالی‌های متوالی آب بسیاری از چاه‌ها خشک و یا شور شده است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی دشت شیرامین در کشور و استان آذربایجان شرقی نشان داده شده است.

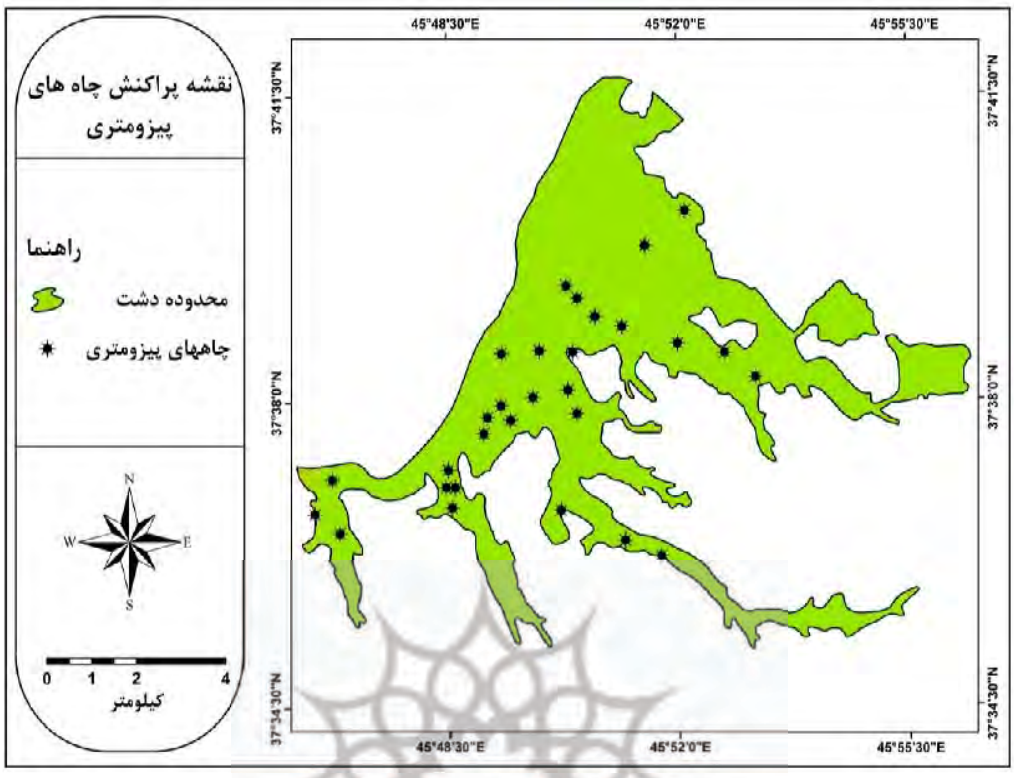
1- Gorai and Kumar



شکل (۱) محدوده‌ی جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه در کشور و استان آذربایجان شرقی

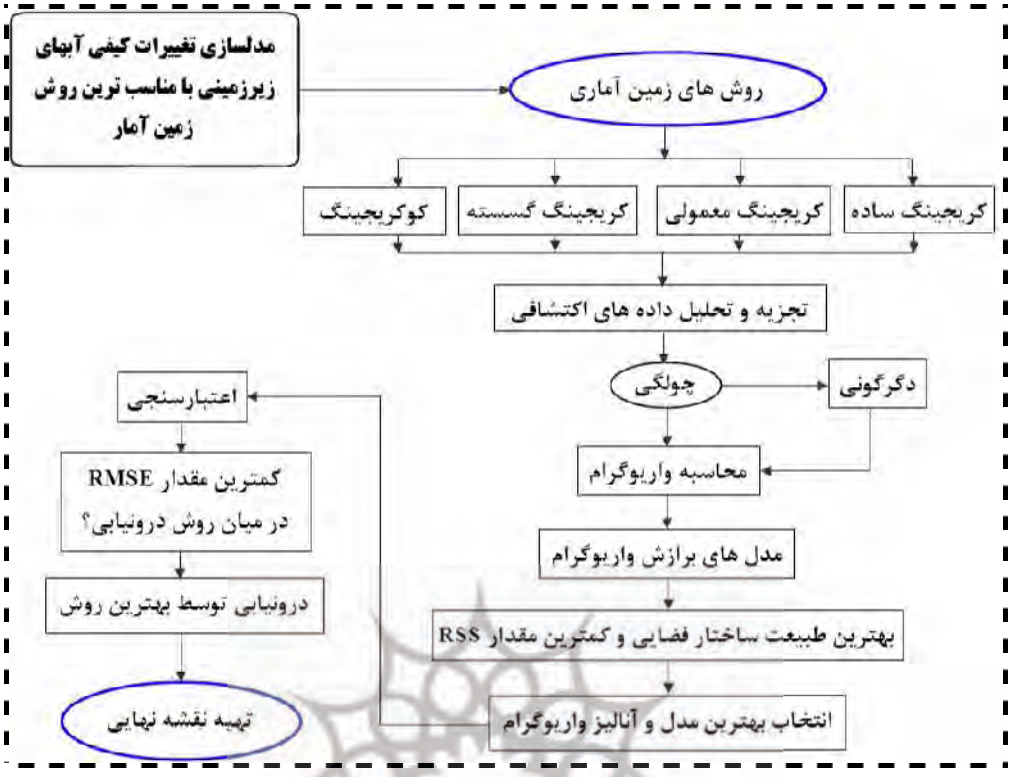
مواد و روش‌ها

با توجه به هدف پژوهش، از نمونه داده‌های منابع آب زیرزمینی دشت شیرامین در سال ۱۳۹۰ که آخرین نمونه‌گیری توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی می‌باشد، استفاده شده است. تعداد ۳۰ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق در سطح دشت به گونه تصادفی و با پراکنش مناسب انتخاب گردید. شکل (۲) چگونگی پراکنش چاه‌های پیزومتری مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این چاه‌ها مشخصات شیمیایی آب شامل قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) آب زیرزمینی دشت شیرامین در سال ۱۳۹۰ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۲) پراکنش چاه‌های پیزومتری در محدوده‌ی مورد مطالعه

پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات مربوط به کیفیت آب‌های زیرزمینی، تمامی داده‌های مربوط به هر عامل از نظر نرمال بودن به وسیله آزمون کلموگراف - اسمیرنف در محیط نرم‌افزاری SPSS محاسبه گردید. پس از کنترل کیفی داده‌ها تغییرات شوری آب زیرزمینی از نظر دو ویژگی EC و SAR در سال ۱۳۹۰ مورد بررسی قرار گرفت. پس از نرمال‌سازی داده‌ها به منظور تبدیل داده‌های نقطه‌ای به داده‌های سطحی در محیط نرم‌افزار ArcGIS از روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ ساده، معمولی، گسسته و کوکریجینگ) استفاده گردید. جهت نشان دادن پیوستگی مکانی متغیرهای مورد بررسی، نیم تغییرنما یا واریوگرام داده‌ها در محیط نرم‌افزاری ArcGIS ترسیم گردید. سپس برای انتخاب بهترین روش درونیابی به منظور تهیه‌ی نقشه‌ی تغییرات EC و SAR دشت شیرامین از روش ارزیابی متقابل استفاده‌شد. شکل (۳)، مراحل انجام کار جهت پیش‌بینی تغییرات کیفی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۳) ساختار مدل زمین‌آمار برای پیش‌بینی تغییرات کیفی آب زیرزمینی

روش درون‌یابی کریجینگ

یکی از روش‌های بسیار مناسب و پیشرفته جهت تحلیل مکانی و توزیع منطقه‌ای داده‌های مکانی، روش کریجینگ می‌باشد. در این تکنیک، از یک روش میانگین وزنی برای توزیع متغیرها استفاده می‌شود، بدین صورت که هر چه متغیر به مبدأ نزدیک‌تر باشد، وزن آن بیشتر و هر چه فاصله دورتر باشد، وزن کمتر خواهد بود. مطلق بودن در درون‌یابی از ویژگی‌های عمده‌ی روش کریجینگ است. بدین مفهوم که مقدار تخمین کمیت در نقاط نمونه‌برداری با مقادیر اندازه‌گیری شده برابر می‌باشد و واریانس تخمین صفر می‌گردد. این ویژگی سبب می‌شود که تخمین‌گر کریجینگ در رسم خطوط هم ارزش از حداکثر نقاط نمونه‌برداری عبور نموده و تمایلی به بسته شدن و دور زدن نداشته باشد و از مرز محدوده‌ی مورد مطالعه فراتر رود (امیدوار و خسروی، ۱۳۸۸: ۱۶). فرمول کلی روش کریجینگ به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i . Z(xi) \qquad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

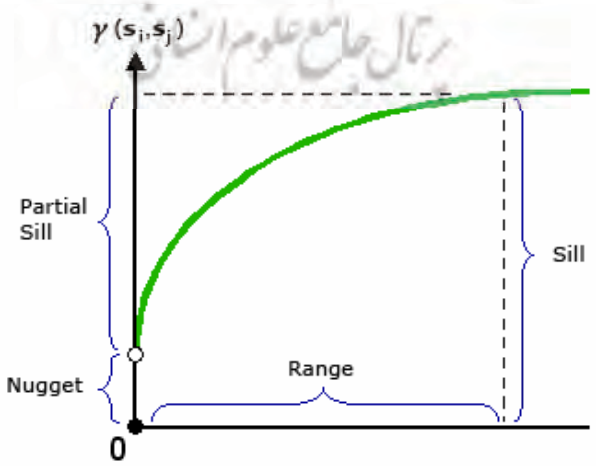
که در رابطه‌ی (۱) $Z^*(x)$: مقدار تخمین متغیر در نقطه‌ی مورد نظر، λi: وزن یا اهمیت نمونه iام، n: تعداد مشاهدات و $Z(xi)$: مقدار مشاهده شده نمونه iام می‌باشد.

نیم‌تغییرنما یا واریوگرام

واریانس مقدار عناصر بین نقاطی به فاصله‌ی h از یکدیگر می‌تواند همبستگی متقابل مقدار دو نقطه به فاصله h را بیان کند. در صورت وجود ساختار فضایی، طبیعی است که وابستگی مقادیر نقاط نزدیک به هم بیشتر از وابستگی مقادیر نقاط دور از هم می‌باشد. بنابراین، چنین واریانسی می‌تواند معیاری برای نمایش تأثیرگذاری و یا تأثیرپذیری مقدار یک نمونه روی مقادیر محیط مجاور خود باشد. این واریانس وابسته به فاصله را تغییرنما می‌نامند و با نماد $2\gamma(h)$ نشان می‌دهند. با تقسیم تغییرنما بر عدد ۲، نیم تغییرنما بدست می‌آید (مدنی، ۱۳۷۷: ۶۵۹). با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان مقدار نیم تغییرنما را محاسبه کرد:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n}[Z(x+h) - Z(x)]^2 \qquad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

که در آن، n(h): تعداد جفت نمونه‌های بکار رفته به ازای یک فاصله‌ی مشخص مانند h، Z(x): متغیر مشاهده شده در نقطه x و Z(x+h): مقدار متغیر مشاهده شده در نقطه به فاصله‌ی h از نقطه‌ی x می‌باشد. از مشخصات واریانس می‌توان به سقف آستانه‌ی تغییرنما و اثر قطعه‌ای اشاره کرد. به مقدار ثابتی که تغییرنما در دامنه تأثیر به آن می‌رسد، آستانه گفته می‌شود. مقدار آستانه برابر واریانس کل تمام نمونه‌هایی است که در محاسبه‌ی نیم تغییرنما به کار رفته‌اند. در روش کریجینگ تغییرنماهایی که به سقف مشخص می‌رسند، اهمیت بیشتری دارند. مقدار تغییرنما در مبدأ مختصات یعنی به ازای h=0، اثر قطعه‌ای (C_0) می‌باشد. در حالت ایده‌آل مقدار C_0 باید صفر باشد. اما در بیشتر مواقع بزرگ‌تر از صفر است. در این حالت جزو تصادفی و یا غیرساختاردار متغیر ظاهر می‌شود (حسنی‌پاک، ۱۳۸۰: ۳۱۵). در شکل (۴)، نمایی از یک واریوگرام و اجزای آن نشان داده شده است.



شکل (۴) نمایی از اجزای واریوگرام

معیارهای ارزیابی

جهت ارزیابی روش‌های درون‌یابی به کار رفته از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شده است. اعتبارسنجی تقاطعی[1] روشی هست که اجازه می‌دهد تا با استفاده از اطلاعات و داده‌های موجود (داده‌های اندازه‌گیری شده)، مقادیر تخمین زده‌شده با مقادیر واقعی مقایسه گردد. در این روش برای هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده که معمولاً تنها ابزار مقایسه می‌باشند، می‌توان تخمین انجام داد و سپس به مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی پرداخت. روش کار به این صورت است که، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شود و با استفاده از سایر نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای تمامی نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به گونه‌ای که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، تخمین وجود خواهد داشت و در پایان با داشتن مقادیر واقعی و تخمینی می‌توان خطا را برآورد نمود. معیارهای گوناگونی برای این کار وجود دارد که می‌توان به جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین انحراف خطا (MBE) اشاره کرد. معادلات و محاسبه آن‌ها به قرار زیر است (گورای و کومار، ۲۰۱۳).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\{z^*(x_i) - z(x_i)\}2} \qquad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|z^*(x_i) - z(x_i)| \qquad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\{z^*(x_i) - z(x_i)\} \qquad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

که در آن‌ها، $z^*(xi)$ و $z(xi)$ به ترتیب مقدار تخمین زده‌شده و مقدار واقعی متغیر Z در نقطه Xi و n تعداد کل مشاهده‌ها، می‌باشد. علاوه بر این دو معیار، ضریب همبستگی (R) بین مقادیر مشاهده شده و تخمین زده شده نیز محاسبه می‌گردد. طبیعی است بهترین روش، آن است که دارای کمترین مقدار RMSE و MAE و بیشترین مقدار R باشد. مقدار MBE، که بیانگر میزان اریبی روش است، در یک تخمین‌گر نسبتاً دقیق بایستی نزدیک صفر باشد.

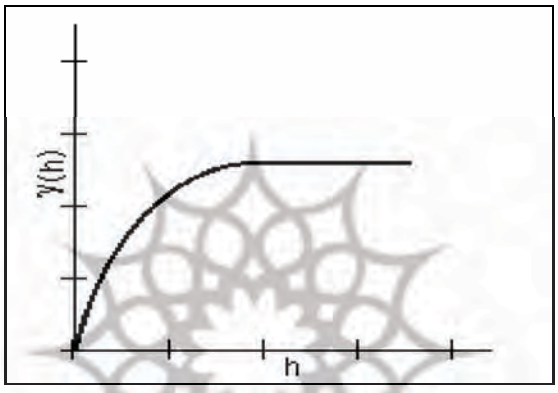
بحث و نتایج

تحلیل متغیرنمای EC

در این تحقیق نسبت اثر قطعه‌ای برای متغیر EC، نشان از وجود وابستگی مکانی شدید ۰/۰۲۱ برای مدل کروی می‌باشد. پارامترهای مدل نیمه تغییرنما برای متغیر EC در جدول (۱) نشان داده شده است. این مدل

1- Cross Validation

از مبدأ مختصات شروع شده و در نزدیکی آن رفتار خطی دارد. با افزایش h منحنی به سرعت به سمت مقادیر بیشتر y(h) صعود می‌کند. آن‌گاه بتدریج از شیب آن کم می‌شود. شکل (۵) متغیرنمای تجربی شاخص EC را نشان می‌دهد. جدول (۲) مقادیر R و RMSE را برای چهار روش کریجینگ ساده، معمولی، گسسته و کوکریجینگ برای عامل EC نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول (۲) چون روش کریجینگ ساده نسبت به سایر روش‌ها دارای R (ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی) بالاتر و RMSE پایین‌تر است، لذا روش کریجینگ ساده به عنوان روش مناسب جهت تهیه‌ی نقشه تغییرات مقادیر EC منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب می‌شود.



شکل (۵) متغیرنمای تجربی برای متغیر EC

جدول (۱) عامل‌های مربوط به متغیر EC

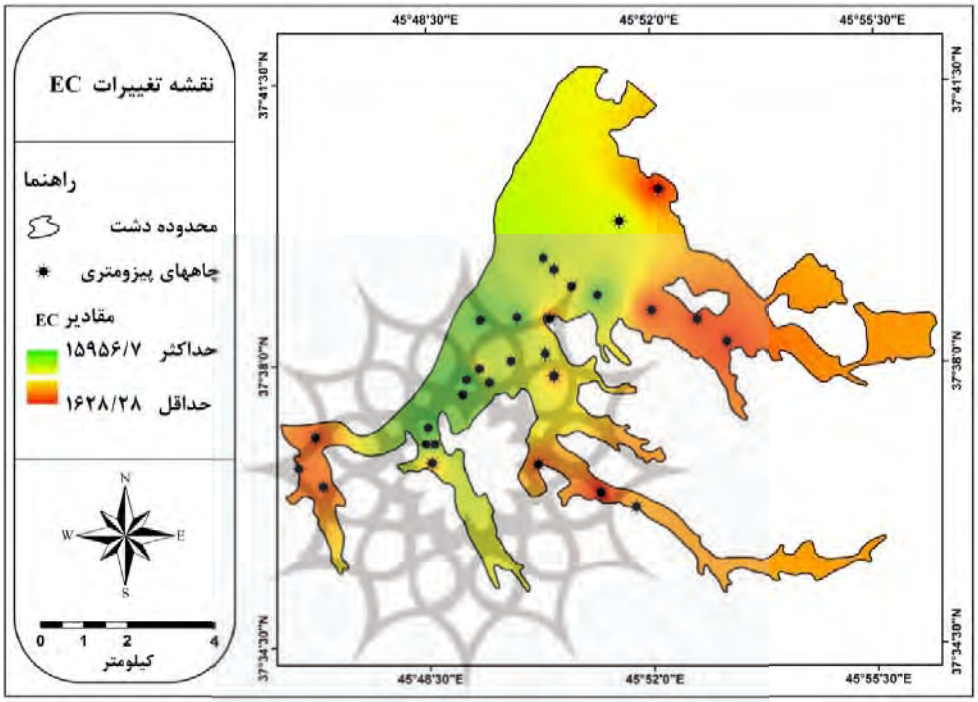
مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	شعاع تأثیر (m)
کروی	۰/۰۲۱	۰/۲۷۵	۷۰۴۰

جدول (۲) مقادیر R و RMSE برای هر یک از روش‌های کریجینگ برای شاخص EC

روش	RMSE	R
کریجینگ ساده	۰/۶۲۸	۵۶۲/۵
کریجینگ معمولی	۰/۶۴۵	۴۸۷/۶
کریجینگ گسسته	۰/۶۹۰	۴۷۸/۵
کوکریجینگ	۰/۶۸۷	۴۲۸/۲

مقادیر هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح منطقه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در محیط GIS بررسی‌شده و نتایج این بررسی‌ها بر روی نقشه‌ی پایه‌ی محدوده‌ی مطالعاتی شیرامین آورده شده است (شکل ۶). این نقشه نشان می‌دهد که مقدار EC از ارتفاعات به طرف دشت یعنی به طرف دریاچه‌ی ارومیه افزایش می‌یابد و روند کلی تغییرات آن حاکی از افزایش EC از شرق به طرف غرب محدوده است که مؤید

جهت جریان آب زیرزمینی منطقه که از سمت شرق به طرف غرب است نیز می‌باشد. البته به دلیل تأثیر نفوذ آب‌شور دریاچه ارومیه باعث ایجاد بی‌نظمی‌هایی به‌صورت محلی در محدوده مطالعاتی شده است. چاه‌هایی که عمق زیادی داشته باشند و یا مناطقی که به دلیل استحصال بیش از حد آب زیرزمینی با افت شدید سطح ایستابی مواجه شده‌اند باعث نفوذ آب‌شور دریاچه‌ی ارومیه و در نتیجه موجب بالا رفتن هدایت الکتریکی منابع آبی محدوده شده‌اند.



شکل (۶) نقشه‌ی تغییرات EC آب زیرزمینی دشت شیرامین بر اساس روش کریجینگ ساده

تحلیل متغیرنمای SAR

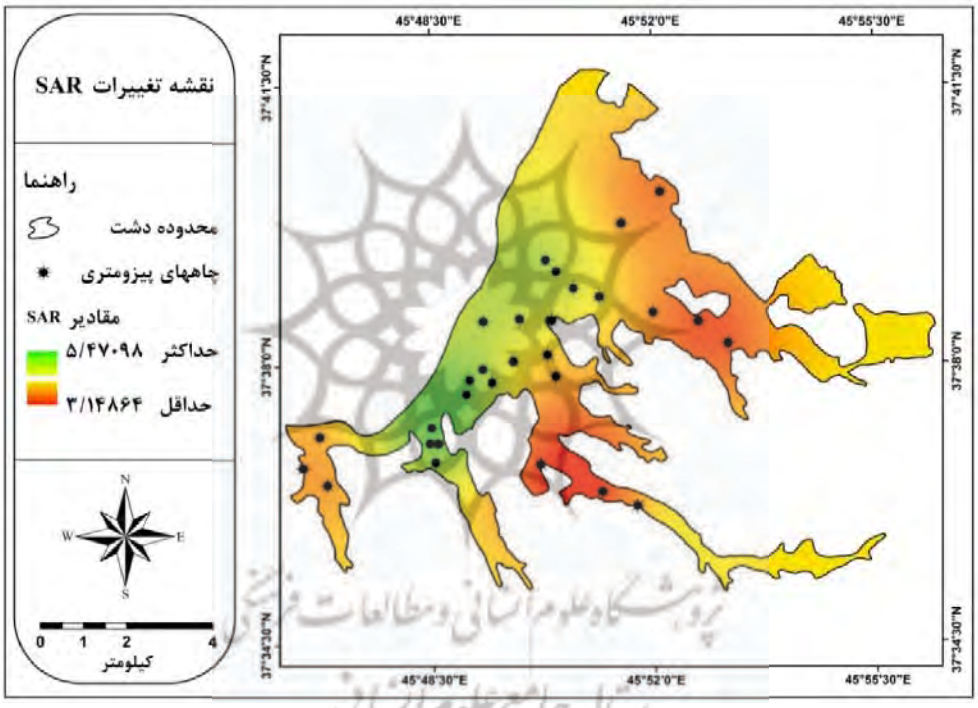
در این مطالعه بهترین مدل برازش داده شده بر نیمه تغییرنمای تجربی برای متغیر SAR مدل کروی می‌باشد. جدول (۳) پارامترهای متغیرنمای SAR را نشان می‌دهد. مقادیر R و RMSE شاخص SAR برای هر یک از روش‌های کریجینگ ساده، معمولی، گسسته و کوکریجینگ در جدول (۴) آورده شده است. بر اساس نتایج جدول چون روش کریجینگ ساده نسبت به سایر روش‌ها دارای RMSE پائین‌تر و R بالاتری است روش کریجینگ ساده به عنوان بهترین روش جهت تهیه‌ی نقشه‌ی تغییرات مقادیر SAR انتخاب می‌شود. تغییرات مقادیر SAR در شکل (۷) نشان داده شده است.

جدول (۳) عامل‌های مربوط به متغیر SAR

مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	شعاع تأثیر (m)
کروی	۰/۰۰۹	۰/۰۳۸	۲۰۸۵

جدول (۴) مقادیر R و RMSE برای هر یک از روش‌های کریجینگ برای شاخص SAR

روش	RMSE	R
کریجینگ ساده	۰/۲۰۸	۰/۲۱۲
کریجینگ معمولی	۰/۲۷۵	۰/۱۸۵
کریجینگ گسسته	۰/۳۰۵	۰/۱۷۴
کوکریجینگ	۰/۳۲۱	۰/۱۹۸



شکل (۷) نقشه‌ی تغییرات SAR آب زیرزمینی دشت شیرامین براساس روش کریجینگ ساده

همانطور که انتظار می‌رفت تغییرات SAR همانند تغییرات EC است. و روند نسبی افزایشی را از سمت شرق به طرف غرب نشان می‌دهد البته مباحثی که در مورد هدایت الکتریکی بیان گردید در مورد SAR نیز تمامی این موارد صدق می‌کنند.

نتیجه‌گیری

امروزه کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی تسهیلات بسیار زیادی را در پهنه‌بندی داده‌های نقطه‌ای بوجود آورده است و استفاده از روش‌های زمین آماری نیز باعث شده که دقت برآوردهای نقطه‌ای لازم برای

پهنه‌بندی از پشتوانه‌ی علمی محکم‌تری برخوردار باشند. از طرف دیگر با استفاده از روش‌های درون‌یابی موجود در زمین آمار، می‌توان تحلیل‌های آماری و پیش‌بینی را در مکان‌های مختلف بر اساس موقعیت مکانی و جغرافیایی پدیده‌ها تحلیل نمود. از این‌رو هدف از انجام این تحقیق انتخاب بهترین روش درون‌یابی به‌منظور بررسی و تحلیل مکانی تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی از نظر EC و SAR بود. بدین منظور از روش‌های زمین‌آمار مانند روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ گسسته و کوکریجینگ استفاده گردید. نتایج به دست آمده از تحلیل واریوگرافی مربوط به عامل‌های کیفی EC و SAR آب زیرزمینی دشت شیرامین نشان داد که بهترین مدل برازش شده به ساختار فضایی هر دو عامل در طول دوره‌ی آماری مورد مطالعه سمی‌واریوگرام مدل کروی می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در مورد مقایسه روش‌های درون‌یابی برای شاخص‌های کیفی EC و SAR آب زیرزمینی، نتایج نشان داد که روش کریجینگ ساده با توجه به RMSE پایین‌تر و R بالاتری نسبت به سایر روش‌ها به عنوان بهترین روش درون‌یابی جهت پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی EC و SAR در طول دوره‌ی آماری مورد بررسی انتخاب شد. نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده با استفاده از روش کریجینگ ساده نشان داد که مقادیر EC و SAR از ارتفاعات به طرف دشت افزایش می‌یابد و روند کلی تغییرات آن حاکی از افزایش آن از شرق به طرف غرب است که مؤید جهت جریان آب زیرزمینی نیز می‌باشد. البته به دلیل تأثیر نفوذ آب شور دریاچه‌ی ارومیه باعث ایجاد بی‌نظمی‌هایی به‌صورت محلی در محدوده‌ی مطالعاتی شده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج پژوهشگرانی همچون قمشیون و همکاران (۱۳۹۱)، کرسیک (۱۹۹۷)، بارکای و پاسارلا (۲۰۰۸)، تقی‌زاده مهجردی و همکاران (۲۰۰۸)، مارنگو و همکاران (۲۰۰۸) و دمیر و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد. پژوهشگران نام برده روش‌های زمین‌آمار، مانند کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، گسسته و کوکریجینگ را به عنوان ابزار مناسب جهت بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی آن‌ها در مناطق مختلف جهان پیشنهاد کرده بودند که نتایج به دست آمده از این تحقیق نیز بیانگر تأیید نتایج محققان مذکور می‌باشد. هدف نهایی از بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی، شبیه‌سازی مطمئن تغییرات این داده‌ها در بعد مکان می‌باشد، به نحوی که جهت اهداف بعدی از جمله پیش‌بینی‌های کوتاه مدت و بلندمدت کیفیت آب‌های زیرزمینی در هر منطقه فراهم شود.

منابع

- امیدوار، کمال و یونس خسروی (۱۳۸۸)، «**ارزیابی روش کریجینگ در تعیین مدلی بهینه جهت پایش شاخص بارندگی استاندارد در محیط GIS (مطالعه‌ی موردی: استان یزد)**»، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، اصفهان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی.

- حسنی پاک، علی‌اصغر (۱۳۸۰)، «**تحلیل داده‌های اکتشافی**»، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

- دلبری، معصومه؛ افراسیاب، پیمان و مژده سالاری (۱۳۹۲)، «**پهنه‌بندی فراسنج‌های کیفی (شوری و سدیمی) آب با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (مطالعه موردی: دشت کرمان)**»، مجله‌ی مهندسی منابع آب، سال ششم، صص ۱۱-۲۴.

- شعبانی، محمد (۱۳۸۷)، «**تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه‌ی نقشه‌ی تغییرات TDS و PH آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارسنجان)**»، مجله‌ی مهندسی آب، سال اول، صص ۵۷-۴۷.

- صالحی، حسین و حسین زینی‌وند (۱۳۹۳)، «**بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای شرب و کشاورزی و انتخاب مناسب‌ترین روش میان‌یابی مکانی آن (مطالعه موردی: غرب شهرستان مریوان)**»، اکوهیدرولوژی، سال اول، شماره‌ی ۳، صص ۱۶۶-۱۵۳.

- صداقت، محمود (۱۳۹۲)، «**زمین و منابع آب (آب‌های زیرزمینی)**»، تهران؛ انتشارات دانشگاه پیام نور.

- قمشیون، مرضیه؛ ملکیان، آرش؛ حسینی، خسرو؛ قره‌چلو، سعید و محمدرضا خاموشی (۱۳۹۱)، «**بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت سمنان-سرخه با استفاده از روش‌های زمین‌آمار**»، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۹، شماره‌ی ۳، صص ۵۴۵-۵۳۵.

- کرمی، فریبا و هانیه کاظمی (۱۳۹۱)، «**پایش مکانی شوری آب‌های زیرزمینی در سال شاخص خشکسالی و ترسالی (مطالعه‌ی موردی: دشت تبریز)**»، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۲۸، صص ۹۴ ۰ ۷۴.

- لشنی‌زند، مهران (۱۳۸۱)، «**بررسی اقلیم خشکسالی‌های ایران و راهکارهای مقابله با آن (مطالعه موردی: شش حوضه‌ی واقع در غرب و شمال غرب ایران)**»، رساله‌ی دکتری، دانشگاه اصفهان.

- مدنی، حسن (۱۳۷۷)، «**مبانی زمین آمار**»، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- Arslan, H., (2012), "**Spatial and Temporal Mapping of Groundwater Salinity Using Ordinary Kriging and Indicator Kriging: The Case of Barfa Plain**", Turkey. Agricultural Water Management, 113, PP: 57–63.

- Barcae, E., Passarella, G., (2008), "**Spatial Evaluation of the Risk of Groundwater Quality Degradation: A Comparison between Disjunctive Kriging and Geostatistical Simulation**", Journal of Environmental Monitoring and Assessment.133, PP: 261-273.

- Demir, Y., Sahin, S., Guler, M., Cemek, B., Gunal, H., Arslan, H., (2009), "**Spatial Variability of Depth and Salinity of Groundwater under Irrigated Ustifluvents in the Middle Black Sea Region of Turke**", Environ Monti Assess, 158, PP: 279-294.

- Dorgham, M.M., Abdel-Aziz, N.E., El-Deeb, K.Z., Okbah, M.A., (2004), "**Eutrophication Problems in the Western Harbour of Alexandria**", Egypt. Oceanologia, 46, PP: 25-44.

- Gorai, A., Kumar, S., (2013), "**Spatial Distribution Analysis of Groundwater Quality Index Using GIS: A Case Study of RanchiMunicapal Corporation (RMC) Area**". GeoinforGeostat", An Overview, 1(2), PP: 1-11.

- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., (1989), "**An Introduction to Applied Geostatistics**", Oxford University Press. New York.

- Kresic, N., (1997), "**Hydrogeology and Groundwater Modeling**", Lewis Publishers.

- Kuisi, M.A., Al- Qinna, M., Margani, A., Aljazzae, T., (2009), "**Spatial Assessment of Salinity and Nitrate Pollution in Amman-Zarga Basin: A Case Study**", Journal of Environmental Earth Sciences, 59, PP: 117-129.

- Li, S., Zhang, Q., (2008), "**Geochemistry of the Upper Han River basin, China, Spatial Distribution of Major ion Compositions and Their Controlling Factors**", Applied Geochemistry, 23(12). PP: 3535-3544.

- Lucassen, E., Smolders, A.J.P., Van Der Salm, A.L., (2004), "**High Groundwater Nitrate Concentrations Inhabit Eutrophication of Sulphate-Rich Freshwater Wetlands**", Biogeochemistry, 67(2), PP: 249-267.

- Marengo, E., Gennaro, C.M., Robboti, E., Maiocchi, A., Pavese, G., Indaco, A., (2008), "**Statistical Analysis of Ground Water distribution in Alessandria Province (Piedmont Italy)**", Microchem, 88, PP: 167-177.

- Taghizade Mehrjardi, R., Zareian, M., Mahmodi, Sh., Heidari, A., (2008), "**Spatial Distribution of Groundwater Quality with Geostatistics (Case Study: Yazd-Ardakan plain)**", World Applied Science Journal, 4(1), PP: 9-17.

- Uyan, M., Cay, T., (2010), "**Geostatistical Methods for Mapping Groundwater Nitrate Concentrations, 3rd** " International Conference on Cartography and GIS, 15-20 June, 2010, Nessebar, Bulgaria.