



مدل سازی زمین آماری کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان بر اساس شاخص ویلکاکس

یاسر حسینی[✉]

۱- استاد، هیئت علمی علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	در این تحقیق با استفاده از روش های زمین آماری، کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان بر اساس شاخص ویلکاکس مورد ارزیابی قرار گرفت. همان طور که نتایج و آماره های ارزیابی به روش کوکریجینگ نشان داد، کوواریوگرام متغیر تصادفی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم از مدل Stable برخوردار بود. برای برآورد متغیر SAR، این کوواریوگرام از میزان اثر قطعه ای (۰/۰۱) و سقف واریوگرام (۰/۰۸) برخوردار بود و برای متغیر هدایت الکتریکی، این مقادیر به ترتیب برابر (۰/۰۲) و (۱/۰۷) محاسبه شد که نشان دهنده نقش غالب مؤلفه ساختاردار کوواریوگرام نسبت به مؤلفه بی ساختار آن است که استحکام ساختار فضایی منطقه برای هر دو متغیر تصادفی را نشان داد. همچنین، نتایج نشان داد روش های مبتنی بر زمین آمار و مدل کوکریجینگ ساده، با مقدار ضریب تبیین ۰/۶۷ و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده ۰/۳۴ برای متغیر تصادفی SAR و مقدار ضریب تبیین ۰/۹۹ و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده ۰/۰۷ برای متغیر هدایت الکتریکی، دارای برآورد دقیقی از کیفیت آب زیرزمینی دشت بود. بطور کلی، می توان گفت تقریباً یک درصد از آب های زیرزمینی دشت در ناحیه C2S1 قرار دارند که می تواند برای کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. از ۹۹ درصد باقی مانده که از نظر شوری در سطح بالایی قرار دارند و برای کشاورزی مناسب نیستند، نزدیک به ۱۴ درصد آن علاوه بر شوری از نظر میزان سدیم نیز برای آبیاری مناسب نیست.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷	
کلید واژه ها: ارزیابی، زمین آمار، کیفیت آب، GIS، پهنه بندی	



Geostatistical modeling of groundwater quality in the Moghan Plain based on the Wilcox index

Yaser Hoseini¹✉

1- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	This study evaluated the groundwater quality of the Moghan Plain based on the Wilcox Index using geostatistical methods. The evaluation results obtained using the cokriging method showed that the covariograms of the random variables electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR) followed the Stable model. For the SAR variable, the covariogram had a nugget effect of 0.01 and a sill of 0.08, whereas these values were 0.02 and 1.07, respectively, for electrical conductivity. These findings indicate the dominance of the structured component of the covariogram over its unstructured component and confirm the strong spatial structure of both random variables. Furthermore, the results showed that geostatistical methods, particularly the simple cokriging model, provided accurate estimates of groundwater quality, with a coefficient of determination (R^2) of 0.67 and a normalized root mean square error (NRMSE) of 0.34 for SAR, and an R^2 of 0.99 and an NRMSE of 0.007 for electrical conductivity. Overall, approximately 1% of the groundwater in the plain was classified as C2S1, indicating its suitability for agricultural use. Among the remaining 99% of the groundwater, which exhibited high salinity and was unsuitable for agriculture, nearly 14% also had excessive sodium levels, making it unsuitable for irrigation.
Article history:	
Received: 2025/12/11	
Accepted: 2026/06/13	
Available online: 2026/06/17	
Keywords: Assessment, Geostatistics, Water quality, GIS, Zoning	

✉ Corresponding author E-mail address: y_hoseini@uma.ac.ir

مقدمه

استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث کاهش سطوح ایستابی دشت‌ها و در نتیجه نشست زمین شده است (پاشایی‌فر و همکاران، ۱۴۰۲). لذا، پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی برگستره یک منطقه مطالعاتی، اولین قدم در برنامه‌ریزی منابع آب است (نخعی‌نژاد فرد و همکاران، ۱۳۹۶). امروزه، با روی آوردن به استفاده از منابع آب زیرزمینی و افزایش نفوذ فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به منابع آب زیرزمینی، کیفیت این آب‌ها کاهش یافته است (میرشکاری و همکاران، ۱۳۹۱). این مسئله، اکثر مناطق را با چالش‌های جدی در زمینه کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی مواجه کرده است (ایمانی و جعفرزاده، ۱۴۰۲). بنابراین مدیریت و حفاظت از آب‌های زیرزمینی و ارزیابی و مطالعه کمی و کیفی این آب‌ها به‌منظور حفظ بهداشت و سلامت عمومی جامعه در کشورهایی مانند ایران بسیار حائز اهمیت بوده و آگاهی از چگونگی تغییرات مکانی- زمانی سفره‌های آب زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه آب زیرزمینی بسیار مهم است (حسنعلی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱). شاخص‌های مختلفی به‌منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی وجود دارد که یکی از این شاخص‌ها، شاخص استاندارد ویلکاکس^۱ (۱۹۵۵) است. حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱) با استفاده از زمین‌آمار کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد را برای استفاده در کشاورزی بررسی کردند و از روش کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی متغیرها استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده هم‌خوانی و همبستگی مشاهدات بود که حاکی از دقت خوب مدل‌های نیم‌تغیرنما و تخمین گر کریجینگ معمولی در میان‌یابی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد بود. ملکیان و میردشتوان (۱۳۹۴)، با استفاده از داده‌های کیفی برداشت شده از ۴۱ حلقه چاه پیرومتری دشت هشتگرد و به کمک روش‌های زمین آماری کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله، پارامترهای نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی را برای تعیین کیفیت آب آبیاری به روش ویلکاکس درون‌یابی کردند. نتایج نشان داد ۹۹ درصد سطح آبخوان در رده خوب C2S1 و یک درصد آن در رده متوسط C3S1 قرار دارد. محمدیاری و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی توزیع مکانی شاخص کیفیت آب مبتنی بر استانداردهای سازمان بهداشت جهانی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه مهران و دهلران پرداختند. نتایج نشان داد ۳۷ درصد از منطقه برای شرب مناسب، ۱۳ درصد نسبتاً مناسب و ۵۰ درصد نامناسب است. در تحقیق ایزدی مهر و ذوالفقاری (۱۴۰۳)، کیفیت آب زیرزمینی دشت فریمان در تربت جام با استفاده از شاخص IRWQIGC مورد مطالعه قرار گرفت. طبق این تحقیق، آب‌های زیرزمینی بخش جنوب و جنوب شرقی دشت فریمان- تربت جام از نظر شوری و سختی و بخش شمالی دشت از نظر پارامتر نترات آلودگی بیشتری داشتند. همچنین در تحقیقی که توسط قربانی و همکاران (۱۴۰۳) انجام شد، کیفیت چاه‌های آب شرب شهرستان تربت جام با استفاده از شاخص WQI مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج نشان داد اکثر منابع آب شهرستان تربت جام از نظر شاخص WQI در محدوده کیفیت آب عالی و خوب قرار دارند و نتایج تکنیک‌های آماری (رگرسیون چندگانه) مشخص نمود پارامتر سدیم (Na) بیشترین ضریب اثرگذاری را در تعیین شاخص WQI دارد و پس آن سولفات، سختی کل، کلرور و جامدات محلول بر این شاخص موثر هستند. در تحقیقی دیگر نخعی و ودیعتی (۱۳۹۲)، کیفیت آب ۲۳ قنات استان تهران را با استفاده از منطق فازی برای مصارف مختلف شرب و کشاورزی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل استنتاج فازی، ابزاری مناسب به- منظور ارزیابی کیفیت آب قنات به شمار می‌رود. در مطالعه‌ای با انجام آنالیز شیمیایی، کیفیت آب زیرزمینی ۱۲ حلقه چاه واقع در دشت سیدان- فاروق از توابع مرودشت شیرا به‌منظور ارزیابی قابلیت استفاده در کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر داده‌های مکانی و تحلیل‌های شیمیایی، دقت بالایی در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دارد (قره‌محمودلو و زارع، ۱۳۹۷). در مطالعه‌ای دیگر، بهرامی‌نسب و همکاران

(۱۳۹۸) با استفاده از داده های ۱۶ ایستگاه نمونه برداری در دشت رشکان (از توابع تبریز)، کیفیت آب زیرزمینی را بر اساس پارامترهای EC، SAR، K و Na مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه از نظر نسبت جذب سدیم (SAR) محدودیت قابل توجهی برای استفاده کشاورزی وجود ندارد، اما شوری آب در بخش وسیعی از دشت در سطح بالا قرار داشته و محدودیت جدی برای کشت محصولات حساس ایجاد می کند. مطالعه خیری و جاناردانا^۱ (۲۰۲۲) نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی دشت ساری-نکا تحت تأثیر مستقیم افزایش یون های محلول به ویژه کلسیم و هدایت الکتریکی قرار دارد. حسنعلی پور و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی اثرات توسعه شهر اردبیل را بر کیفیت آب سطحی و زیرزمینی دشت اردبیل مورد ارزیابی قرار دادند و اظهار داشتند که در بخش های شمال، شمال شرق و شرق به طرف مرکز، جنوب و جنوب شرقی غلظت پارامترهای کیفیت آب افزایش یافته و علت آن را کاهش کیفیت آب در اثر توسعه شهری عنوان کردند. در تحقیقی که توسط سالاری (۱۴۰۲) انجام شد، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت شیراز با استفاده از نرم افزار Chemistry و پارامترهای خطر سلامت، مانند مصرف مزمن روزانه و ضریب خطر مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این کار، داده های ۱۰ پارامتر کیفی مؤثر، شامل EC، Ca^{2+} ، K^+ ، pH، SO_4^{2-} ، Cl^- ، Na^+ ، Mg^{2+} و TDS مربوط به ۲۲ حلقه چاه منطقه جمع آوری شد. نتایج نشان داد با توجه به شاخص کیفی ویلکاکس و شولر، آب های زیرزمینی منطقه برای مصارف کشاورزی کیفیتی در حد متوسط و از نظر شرب در حد قابل قبول قرار دارند. با توجه به مطالب بیان شده به منظور پهنه بندی دقیق کیفیت آب، نیازمند ابزارهای جدید در قالب اطلاعات مکانی و روش های دقیق میان یابی هستیم که بتواند ارزیابی کیفی آب زیرزمینی را به طور دقیق در سطح منطقه گسترش داده و امکان بهره برداری بهینه از منابع زیرزمینی را فراهم سازد. یکی از این ابزارها و روش ها، روش های مبتنی بر زمین آمار و یا کریجینگ است؛ زیرا در روش های تخمین کلاسیک از جمله روش تیسن موقعیت مکانی داده ها و جهت آن ها، در برآورد مقادیر متغیر تصادفی مد نظر قرار نمی گیرد (توییک^۲، ۲۰۱۸). لیکن در زمین آمار و تخمین های مربوط به آن، این دو فاکتور مورد توجه قرار می گیرد (کریمی^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). در تحقیقات انجام شده عموماً از روش های زمین آماری بدون متغیر کمکی برای افزایش دقت ارزیابی نهایی استفاده شده است (حسینی و کامرانی^۴، ۲۰۱۸). در این تحقیق، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مغان در شمال استان اردبیل با استفاده از روش های زمین آماری و شاخص ویلکاکس و با استفاده از متغیر کمکی و روش کوکریجینگ، برای تخمین دقیق و نقطه به نقطه شاخص کیفیت آب در سطح دشت، از نقطه نظر کشاورزی استفاده خواهد شد.

مواد و روش ها

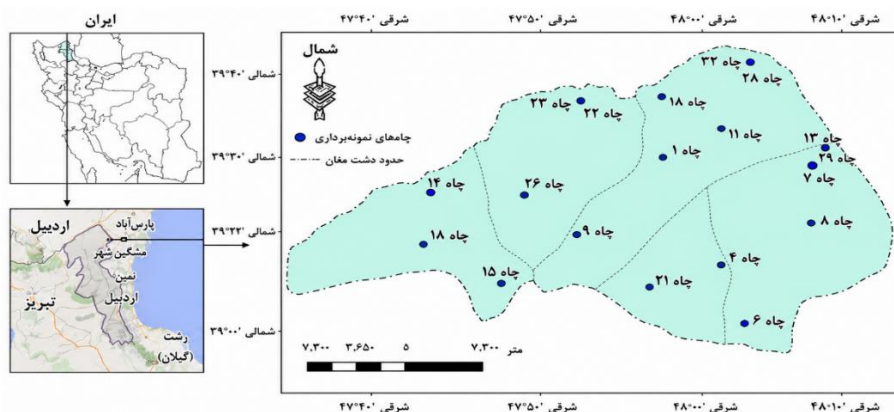
محدوده مورد مطالعه به وسعت ۶۷۴/۵ کیلومتر مربع بخشی از اراضی دشت مغان در شهرستان پارس آباد و ۲۳۰ کیلومتری شمال غربی اردبیل واقع در استان اردبیل است. در این مطالعات از کیفیت آب ۲۹ چاه بهره برداری که در محدوده مورد مطالعه قرار داشتند، استفاده شد. تلاش شد چاه های انتخاب شده در محدوده مشخصی قرار داشته و فاصله زیادی از یکدیگر نداشته باشند و در مناطق مرزی محدوده نیز داده هایی موجود باشد تا واریوگرام ها با دقت بالایی ترسیم شود. داده های کیفی آب از سازمان آب منطقه ای اردبیل اخذ شده و مربوط به دوره آماری ۱۴۰۲-۱۴۰۳ است. شکل (۱) نمای دشت مذکور و نقاط نمونه برداری شده را نشان می دهد. در شکل (۲) نقشه خاک شناسی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین در شکل (۳) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

1- Khairy & Janardhana

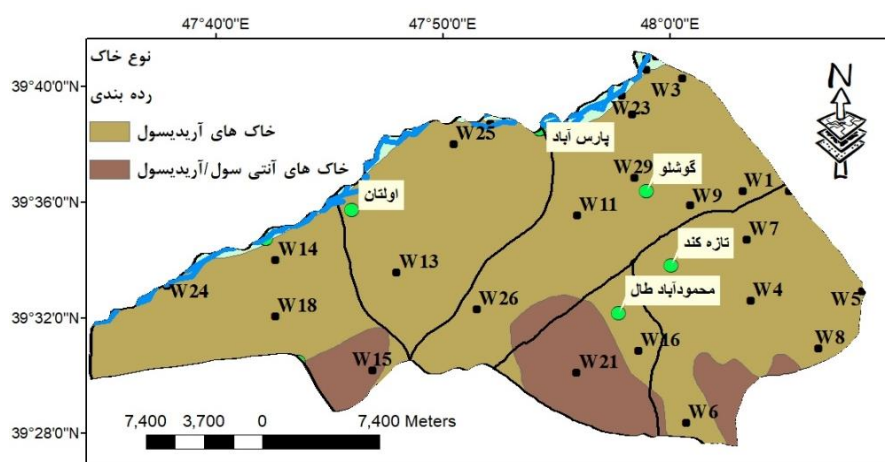
2- Tuik

3- Karimi

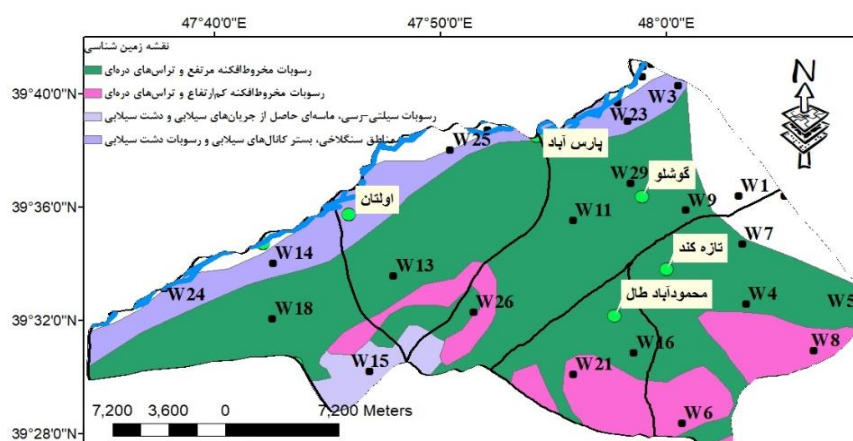
4- Hoseini & Kamrani



شکل (۱) موقعیت دشت در استان اردبیل و چاه‌های مطالعاتی



شکل (۲) نقشه خاک شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل (۳) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

• تئوری زمین‌آمار

روش میان‌یابی زمین‌آمار دارای خصوصیتی است که سبب استفاده روزافزون از این روش در برآوردها شده است. در

روش های تخمین کلاسیک، موقعیت مکانی داده ها و جهت آن در برآورد مقادیر متغیر تصادفی در منطقه مدنظر نبوده و ضریب داده ها برای تخمین به جهت و مکان آن داده ها وابسته نیست؛ ولی در زمین آمار این دو فاکتور مورد توجه قرار می گیرد. مهم ترین مفاهیم زمین آمار، شامل متغیر ناحیه ای^۱، نیم تغییر نما^۲، واریانس تخمین^۳ و روش تخمین است (رمی^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). مقدار متغیر ناحیه ای $Z(x)$ در هر نقطه را می توان به دو مؤلفه جزمی و تصادفی تجزیه کرد. بنابراین، می توان نوشت:

$$Z(x) = m(x) + y(x) \quad (۱)$$

در رابطه فوق، $Z(x)$: مقدار متغیر ناحیه ای در نقطه ای با مختصات (x) ، $m(x)$: مؤلفه جزمی متغیر ناحیه ای و $y(x)$: مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه ای است. نیم تغییر نما، همبستگی مکانی بین نقاط اندازه گیری شده را با توجه به فاصله و جهت آن ها نشان می دهد. مقدار نیم تغییر نما به شرح زیر محاسبه می شود:

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

در رابطه فوق، $n(h)$: تعداد جفت نمونه های به کار رفته در محاسبات به ازای هر فاصله h است، بنابراین تعداد جفت ها تابع h است که معمولاً با افزایش h تعداد جفت ها کم می شود و $Z(x)$ و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در دو نقطه به مختصات (x) و $(x+h)$ است که به فاصله h از هم قرار دارند.

واریانس تخمین که با نماد $\sigma^2 E$ نشان داده می شود، نشانگر واریانس خطای بین مقدار حقیقی و مقدار تخمینی یک متغیر است. توانایی محاسبه واریانس تخمین، یکی از مهم ترین نقاط قوت زمین آمار است (حسینی^۵، ۲۰۲۳). رابطه کلی تخمین کریجینگ به صورت زیر است:

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x) \quad (۳)$$

در رابطه فوق، $Z(x_i)$: مقدار مشاهده شده Z در نقطه λ_i : وزن یا اهمیت نسبت داده شده به مقدار Z در نقطه و $Z^*(x)$: مقدار تخمین زده شده Z در نقطه x است.

• طبقه بندی ویلکاکس

استانداردهای کیفی آب آبیاری بر اساس سه عامل بنا شده است (فائو^۶، ۲۰۲۱؛ آیرز و وستکات^۷، ۲۰۲۰).

۱- غلظت کل نمک های محلول آب که این غلظت از طریق اعمال اسمزی بر روی محصول اثر می گذارد. ۲- غلظت یون هایی که ممکن است برای گیاهان مضر باشد (مانند بر). ۳- غلظت کاتیون هایی که می توانند باعث پراکندگی رس در خاک شده و در نتیجه ساختمان خاک را تخریب کرده و مقدار نفوذ را کاهش دهد.

1- Regionalized variable

2- Semivariogram

2- Estimation variance

3-

4- Remy

5- Hoseini

6- FAO

7- Ayers & Westcot

یکی از قدیمی ترین سیستم های طبقه بندی آب برای آبیاری تقسیم بندی ویلکاکس است که بر اساس هدایت الکتریکی (EC) و درصد سدیم بنا شده است. درصد سدیم از فرمول زیر به دست می آید (همه غلظت یون ها بر حسب میلی اکی والان در لیتر است):

$$Na(\%) = \frac{Na + K}{Na + K + Ca + Mg} \times 100 \quad (4)$$

خطر سدیم و خطر شوری دو معیار مهم در طبقه بندی آب های آبیاری است و میزان هدایت الکتریکی و TDS نشان دهنده خطر شوری است، این پارامتر بر اساس جدول (۱) تعیین می شود. خطر سدیم بر حسب نسبت جذب سدیم (SAR) به صورت زیر بیان می شود (همه غلظت یون ها بر حسب میلی اکی والان در لیتر می باشند) (سوارز^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (5)$$

علاوه بر خطر شوری و خطر سدیم، خطر کربنات سدیم باقی مانده که به طور مختصر با (RSC) نشان داده می شود نیز یکی از معیارهای آب آبیاری است. خطر RSC به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود (همه غلظت یون ها بر حسب میلی اکی والان در لیتر می باشند) (فائو، ۲۰۲۱؛ آیز و وستکات، ۲۰۲۰).

$$RSC = [(HCO_3 + CO_3) - (Ca + Mg)] \quad (6)$$

واحدهای غلظت یون ها بر حسب میلی اکی والان بر لیتر است. آب های دارای RSC کمتر از ۱/۲۵ (میلی اکی والان در لیتر) برای آبیاری مناسب هستند، در حالی که آب های دارای RSC بیش از ۲/۵ (میلی اکی والان در لیتر) برای آبیاری نامناسب است.

جدول (۱) تعیین میزان شوری آب آبیاری بر اساس EC و SAR

کیفیت	شاخص	SAR	کیفیت	میزان شوری	شاخص	EC (μmhos/cm)
عالی	S1	۱۰ SAR <	بدون تاثیرات زیان آور	شوری کم	C1	<۲۵۰
خوب	S2	۱۸ SAR < ۱۰	مضر برای گیاهان حساس	شوری متوسط	C2	۲۵۰-۸۵۰
متوسط	S3	۲۶ SAR < ۱۸	مضر برای اکثر گیاهان	شوری زیاد	C3	۸۵۰-۲۲۵۰
نامناسب	S4	۲۶ SAR >	فقط مناسب برای گیاهان مقاوم	شوری خیلی زیاد	C4	۲۲۵۰-۵۰۰۰

• معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل از آماره های ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۲، درصد خطای نسبی^۳ (ε)، میانگین خطای مطلق^۴، ضریب تبیین^۵ (R²)، ضریب باقی مانده جرم^۶ و کارایی مدل^۷ استفاده شد. بهترین پیش بینی ها زمانی رخ می دهد که آماره های CRM، NRMSE، ε و MAE به صفر، همچنین R² و کارایی مدل به یک نزدیک تر شود. روابط

1- Suarez

2- Normalized Root mean square error (scatter index) - NRMSE

3- Relative percentage error

4- Mean Absolute Error (MAE)

5- Goodness of Fit

6- Coefficient of Residual Mass (CRM)

7- Model Efficiency (EF)

۷ الی ۱۲ معادلات مذکور را نشان می دهند.

$$NRMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum Q_i^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (10)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (11)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (12)$$

در روابط فوق، N: تعداد نمونه، P_i : مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، Q_i : مقادیر واقعی، $\bar{P}$: میانگین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، $\bar{Q}$: میانگین مقادیر واقعی است.

یافته های پژوهش

• آمار توصیفی داده ها

در جدول (۲) نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب، از نظر شاخص ویلکاکس ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی نمونه آب چاه ها به ترتیب برابر با ۴۶۴ و ۱۶۰۷۰ (میکروموس بر سانتی متر) است.

جدول (۲) طبقه بندی نمونه های آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی بر اساس دیگرام ویلکاکس

محل نمونه برداری	علامت اختصاری	SAR	EC ($\mu\text{mhos/cm}$)	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی	کیفیت براساس RSC
قطار آباد	W1	۲۸/۳۵	۱۱۹۳۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
فیروز آباد - زهکش	W2	۴۷/۱۷	۶۳۹۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	نامناسب
تک بلاغ قاسمعلی	W3	۱۷/۷۳	۴۴۵۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
تکله	W4	۲۰/۸	۴۱۶۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
نهرنادر- تک اغاج	W5	۶/۵	۳۳۳۰	C4-S2	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
کانال	W6	۶	۳۲۱۰	C4-S2	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
فیروز آباد کارگاه	W7	۲۲/۴	۲۶۱۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	قابل قبول
گورد-گل	W8	۴/۳	۱۰۶۳	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب
تکچی (جنب قبرستان)	W9	۴/۹	۸۶۹	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب
پارس آباد دبیرستان	W10	۲۲/۳	۶۰۵۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
ایران آباد- جنب کانال	W11	۱۰/۴	۴۵۵۰	C4-S3	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
پاسگاه تازه کند	W12	۱۹	۸۳۰۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
صفرلو	W13	۷/۷	۷۷۲	C3-S2	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	قابل قبول

محل نمونه برداری	علامت اختصاری	SAR	EC ($\mu\text{mhos/cm}$)	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی	کیفیت براساس RSC
کارخانه اسفالت	W14	۲/۸	۱۰۱۹	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب
تصفیه خانه-پارس اباد	W15	۲۳/۵	۷۴۲۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
روستا-اسکیپ	W16	۸/۱	۱۲۳۴	C3-S2	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب
تازه کند	W17	۱۰/۲	۵۳۲۰	C4-S3	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
جنب-کارگاه-بخش	W18	۴/۱	۱۳۸۸	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب
بیوک-خانلو-جنب	W19	۱۷/۵	۴۶۹۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
سمت راست کانال	W20	۱/۸	۵۱۸	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	مناسب
امیر خانلو	W21	۴۰	۶۳۶۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
اصبر ےندی	W22	۱۹/۱	۷۲۵۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
ورودی دستلوکندی	W23	۸/۷	۳۶۵۰	C4-S3	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
سه راه خلیلی لو	W24	۹/۲	۲۱۹۰	C3-S3	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب
قره داغلو	W25	۸/۱	۱۱۲۴	C3-S2	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	نامناسب
جاده پروژه	W26	۴۰	۱۶۰۷۰	C4-S4	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
پارس اباد روبروی مخابرات	W27	۶/۴	۳۲۸۰	C4-S2	خیلی شور - برای کشاورزی	مناسب
پتلو	W28	۱/۳۹	۴۶۴	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	مناسب
کوشلو	W29	۴/۵	۹۰۱	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی	مناسب

• بررسی نرمال بودن داده‌ها، حذف روند، محاسبه و مدل سازی واریوگرام

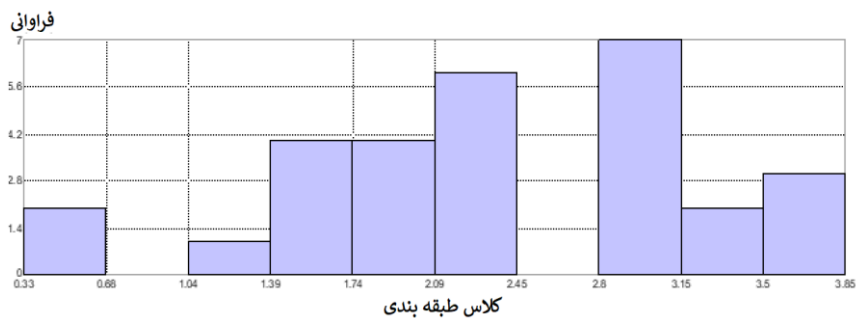
برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی منطقه براساس شاخص ویلکاکس، نخست می‌بایست شاخص‌های موثر بر آن، یعنی میزان هدایت هیدرولیکی و درصد سدیم قابل تبادل آب با استفاده از روش‌های زمین‌آماري برآورد شود. سپس با روی هم قرار گرفتن نقشه‌های هم‌ارزش هدایت الکتریکی و میزان SAR، کیفیت آب زیرزمینی منطقه تعیین می‌شود. از آنجا که به‌منظور برآورد متغیرهای هدایت الکتریکی و میزان SAR، به روش کوکریجینگ، نیاز به داده‌های با توزیع نرمال است، نخست منحنی فراوانی این متغیرها در سطح منطقه محاسبه شد. از آنجا که توزیع نرمال داده‌ها باید دارای چولگی صفر و کشیدگی ۳ باشد، بررسی توزیع این متغیرها نشان داد که توزیع این داده‌ها در منطقه نرمال نبوده و لذا می‌بایست از روش‌های تبدیل در نرم‌افزار GIS10.4 و افزونه تحلیل زمین‌آماري^۱ بهره برد. لذا با استفاده از روش لوگ نرمال، توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک شد (اشکال ۴ و ۵). سپس با دادن مختصات UTM نقاط به نرم‌افزار وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها بررسی شد که وجود روند در داده‌ها در جهات X و Y مشاهده شد، لذا از آنجا که در تخمین به روش کوکریجینگ می‌بایست روند را از داده‌ها حذف نمود، در مرحله بعد، روند داده‌ها حذف شد (اشکال ۶ و ۷). در مرحله بعد، بهترین واریوگرام داده‌ها که دارای کمترین اثر قطعه‌ای بود، انتخاب شد. برای برآورد متغیر SAR، این کوواریوگرام از مدل Stable با میزان اثر قطعه‌ای^۲ (۰/۰۱) و سقف واریوگرام^۳ (۰/۰۸) برخوردار بود و برای متغیر هدایت الکتریکی میزان اثر قطعه‌ای، (۰/۰۲) و سقف (۱/۰۷) محاسبه شد. با توجه به این اعداد، از آنجا که نسبت اثر قطعه‌ای به سقف واریوگرام در هر دو متغیر کوچکتر از ۰/۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که نقش مؤلفه ساختاردار واریوگرام بیش از نقش مؤلفه بی‌ساختار آن بوده و این نشان‌دهنده استحکام ساختار فضایی متغیر تصادفی در منطقه است (سانترا^۴ و همکاران، ۲۰۰۸). در شکل‌های (۸) و (۹) سمی واریوگرام متغیر SAR و هدایت الکتریکی نشان داده شده است.

1- Geostatistical Analysis

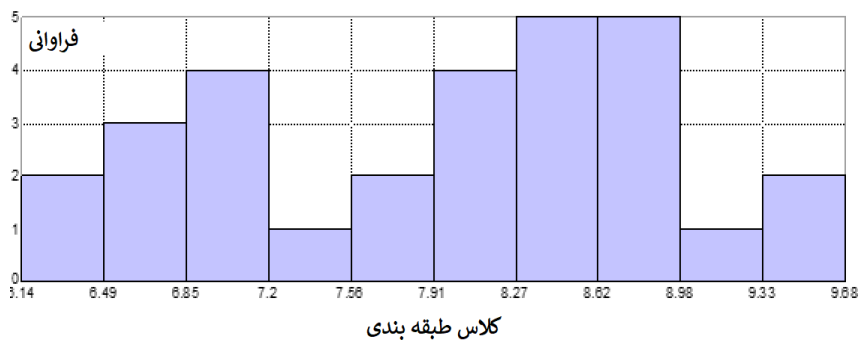
2- Nugget

3- Sill

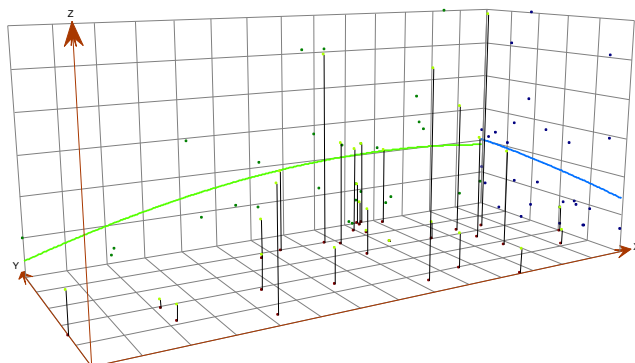
4- Santra



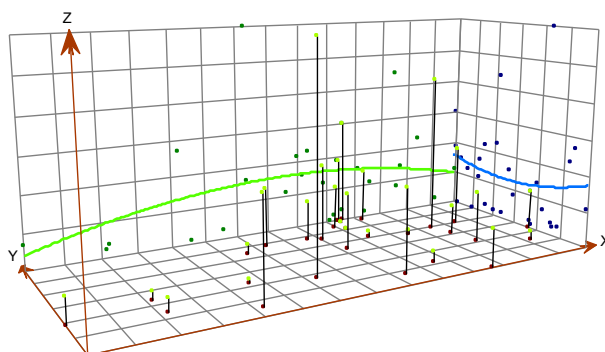
شکل (۴) نمودار فراوانی شاخص SAR تبدیل شده



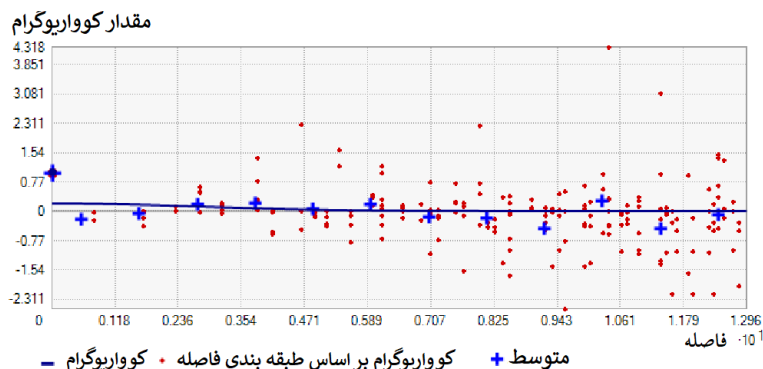
شکل (۵) نمودار فراوانی متغیر کمکی هدایت الکتریکی تبدیل شده



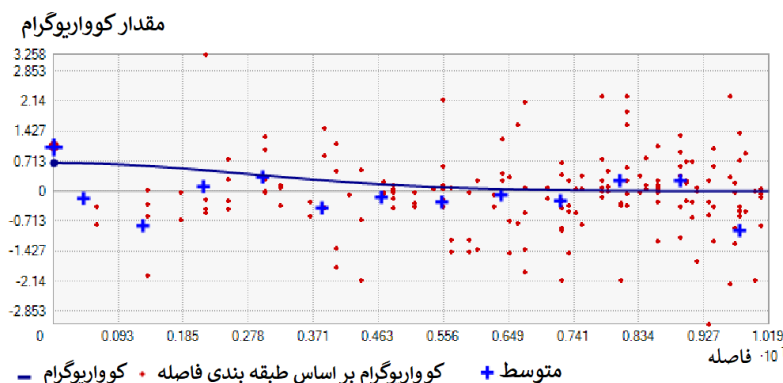
شکل (۶) وجود روند در راستای محورهای y, x برای شاخص SAR



شکل (۷) وجود روند در راستای محورهای y, x برای شاخص کمکی هدایت الکتریکی



شکل (۸) کواریوگرام بدست آمده در روش کریجینگ ساده برای متغیر SAR



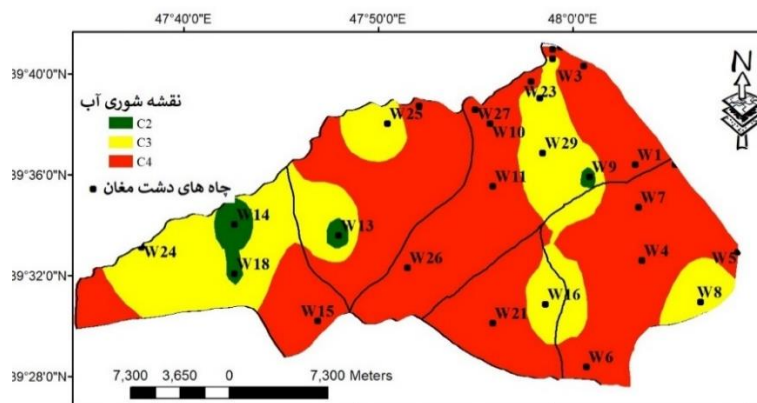
شکل (۹) کواریوگرام بدست آمده در روش کریجینگ ساده برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی

● نقشه‌های هم‌ارزش پارامترهای موثر با استفاده از روش کوکریجینگ

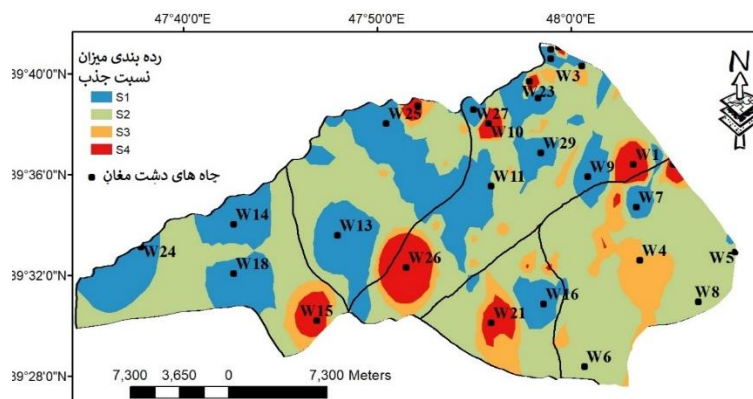
پس از تعیین بهترین نوع کواریوگرام متغیرهای موثر، در نهایت برآورد داده‌ها به منظور تعیین بهترین نوع کریجینگ به روش‌های مختلف کوکریجینگ ساده^۱، کوکریجینگ معمولی^۲ و کوکریجینگ عمومی^۳ صورت گرفت و با توجه به نتایج دقیق‌تر کوکریجینگ ساده، این مدل برای تخمین استفاده شد و مقادیر متغیرها در سطح منطقه برآورد شد و نقشه‌های هم‌ارزش آن‌ها در سطح دشت ارائه شد که در اشکال (۱۰) تا (۱۲)، نشان داده شده است. در تحقیق حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱)، کریجینگ معمولی نتایج دقیق‌تری ارائه نمود که با نتایج این تحقیق متفاوت است. منحنی‌های هم‌ارزش هدایت الکتریکی منطقه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بر این اساس به ترتیب ۸، ۱۸۸ و ۴۷۸ (کیلومتر مربع) از دشت مورد مطالعه، به ترتیب در کلاس‌های C2، C3 و C4 قرار دارد، همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود. بیش از ۷۱ درصد دشت در ناحیه "خیلی شور" قرار دارد که از نظر کشاورزی مناسب نیست. حدوداً ۲۸ درصد دشت نیز در ناحیه "شوری زیاد" قرار دارد که برای اکثر گیاهان مناسب نیست. فقط حدوداً یک درصد منطقه از نظر شوری در ناحیه "شوری کم" قرار دارد که در قسمت غربی دشت و در ناحیه اولتان قرار می‌گیرد. مقدار شوری آب زیرزمینی عموماً از سمت غرب به سمت شرق کاهش می‌یابد، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است. این مناطق دارای خاک اریدیسول^۴ می‌باشند که عموماً دارای مواد آلی ضعیف بوده و از درصد ازت خاک

1- Simple Co-kriging
2- Ordinary Co-kriging
3- Universal Co-kriging
4- Aridisol

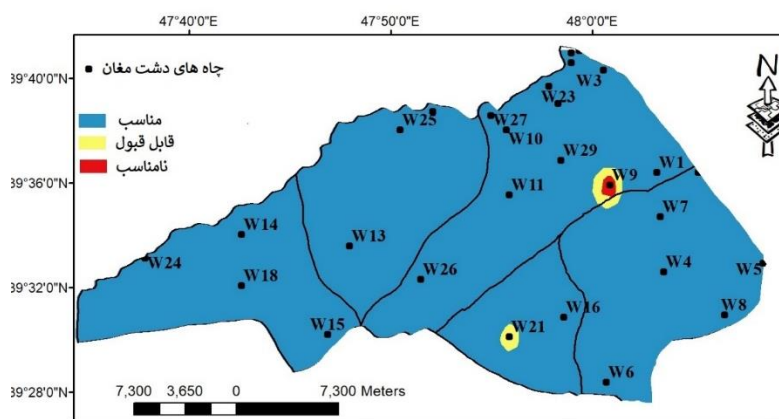
پایینی برخوردار هستند. از آنجا که کاربری اراضی دشت کشاورزی است، لذا برای جبران کمبود مواد آلی و معدنی خاک از انواع کودهای مختلف استفاده می شود. از آنجا که در بخش شمالی دشت، رودخانه مرزی ارس مانند یک زهکش طبیعی عمل کرده و جریان آب زیرزمینی و آب مازاد آبیاری به سمت آن است، لذا کاهش کیفیت آب چه از نظر میزان سدیم و همچنین شوری، می تواند به دلیل این موضوع باشد. در شکل (۱۱) نقشه هم مقدار نسبت جذب سدیم آب زیرزمینی منطقه نشان داده شده است. بر این اساس به ترتیب ۳۶، ۴۹، ۱۰ و ۵ درصد از مساحت دشت مورد مطالعه، به ترتیب در کلاس های S1، S2، S3 و S4 قرار دارد که به ترتیب معادل ۲۴۹، ۳۳۶، ۷۱ و ۱۸ (کیلومتر مربع) از مساحت دشت مورد مطالعه را به خود اختصاص داده اند. با توجه به این شکل، غلظت SAR در بخش هایی در شمال و غرب دشت در ناحیه عالی و خوب طبقه بندی می شود و مناسب برای کشاورزی بوده و مشکلی ایجاد نمی کند. در بخش هایی در جنوب دشت در ناحیه مربوط به شعاع تاثیر چاه های شماره ۲۱ و ۲۳، کیفیت آب از نظر میزان سدیم در ناحیه نامناسب قرار دارد؛ همانطور که در نقشه خاکشناسی نشان داده شده است. این مناطق عموماً در ناحیه Entisols/Aridisols قرار دارند که خصوصیت بارز آن ها جوانی و لایه ای بودن است که سبب شده است در افق های این نوع خاک مواد آلی کمی دیده شود. علاوه بر این در این نوع خاک ها، لایه سطحی متأثر از فعالیت های انسانی دیده می شود که می تواند به علت فعالیت کشاورزی باشد. علاوه بر این، یکی دیگر از دلایل آن را می توان فعالیت کارخانه های کشت و صنعت مغان در این ناحیه و دفع پساب و نفوذ آن به منابع آب زیرزمینی منطقه دانست. در شکل (۱۲)، نقشه هم ارزش کربنات سدیم باقیمانده آب زیرزمینی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، بیش از ۹۹ درصد دشت، معادل ۶۷۰ (کیلومتر مربع) از مساحت دشت در ناحیه مناسب از نظر کربنات کلسیم باقیمانده است و لذا در دشت، مشکلی از نظر رسوب کربنات نشان داده نشده است که با تحقیقات شیروانی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. البته باید به این مسئله توجه داشت که با بررسی مقادیر کاتیون های موثر بر رسوب کربنات، یعنی کلسیم و منیزیم، مشخص می شود، غلظت کلسیم از بخش شمالی به سمت جنوب و غرب دشت افزایش می یابد. علت این موضوع انحلال بیشتر کانی های حاوی کلسیم مانند ژئپس در مسیر جریان آب زیرزمینی است. کانی هایی مانند آمفیبول ها، فلدسپارها، و پیروکسن ها موجب افزایش کلسیم و منیزیم آب های زیرزمینی می شوند. در خاک های رسوبی، کلسیم در کانی های کلسیت، آراگونیت، دولومیت و ژئپس حضور دارد. غلظت کلسیم در آب های زیرزمینی معمولاً کمتر از ۱۰۰ (میلی گرم در لیتر) است. اکثر آب های زیرزمینی به استثناء مواقعی که آب ها در تماس با دولومیت یا خاک های غنی از منیزیم باشند، محتوی مقادیر نسبتاً کمی از منیزیم می باشند. در منطقه مورد مطالعه، مقدار منیزیم، کمتر از ۲۰ (میلی گرم در لیتر) است.



شکل (۱۰) نقشه هم ارزش هدایت الکتریکی دشت مغان



شکل (۱۱) نقشه هم ارزش نسبت جذب سدییم آب زیرزمینی دشت مغان



شکل (۱۲) نقشه هم ارزش کربنات سدییم باقیمانده آب زیرزمینی دشت مغان

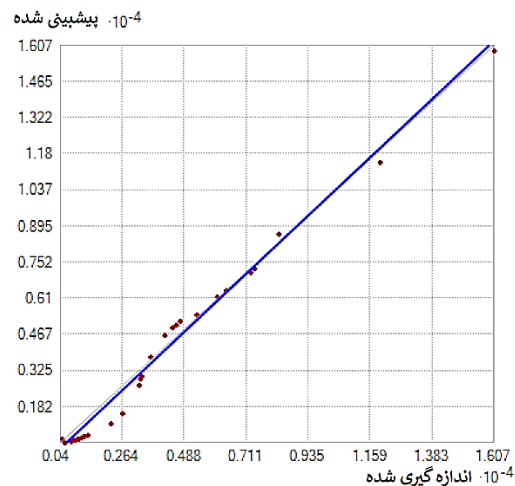
در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، روش اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی روش تخمین کوکریجینگ برای متغیرهای هدایت الکتریکی و SAR ارائه شده است. همان‌طور که در تصویر مشخص است، مدل کوکریجینگ ساده از قابلیت خوب و دقت بالایی در برآورد متغیرهای هدایت الکتریکی و SAR برخوردار است که این امر می‌تواند به دلیل نسبت پایین اثر قطعه‌ای به سقف واریوگرام متغیرهای مورد بررسی باشد و با نتایج کاستینی^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، مطابقت دارد. ایشان در مطالعه‌ای نشان داد، با نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه به کمتر از ۶۰ درصد که نشان‌دهنده ساختار فضایی قوی متغیر ناحیه‌ای در منطقه است، می‌توان برآوردهای دقیقی از متغیر ناحیه‌ای ارائه داد. در جداول (۳) و (۴) نیز شاخص‌های کمی ارزیابی مدل نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول‌ها مشخص است، روش‌های مبتنی بر زمین آمار و مدل کوکریجینگ ساده، با مقدار ضریب تبیین ۰/۶۷ و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده برابر ۰/۳۴ برای متغیر تصادفی SAR و مقدار ضریب تبیین ۰/۹۹ و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده ۰/۰۷ برای متغیر هدایت الکتریکی، دارای برآزش و برآورد دقیقی از هر دو متغیر تصادفی در سطح منطقه است. این دقت برآورد، از مطالعات انجام‌شده توسط اقیار^۲ و همکاران (۲۰۰۷) با مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۰/۴ و ضریب تبیین برابر ۰/۶ و همچنین مردون^۳ و همکاران (۲۰۰۶)، با ضریب تبیین ۰/۹۵ و مقدار مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۴۴ بیش‌تر

1- Castellini

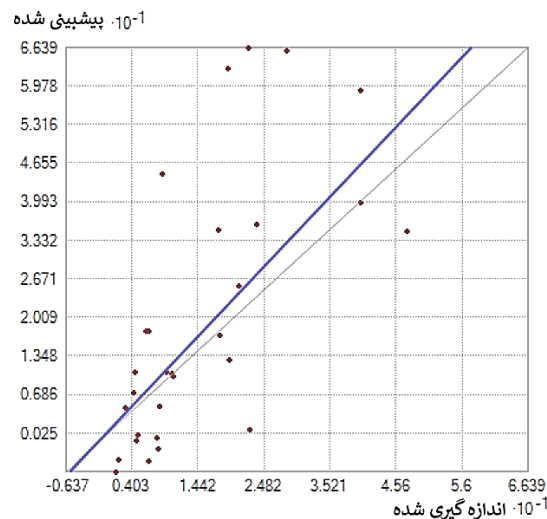
2- Agyare

3- Merdun

است. در تحقیق قره محمدلو و زارع (۱۳۹۷) نیز دقت بالای روش های زمین آماری در بررسی کیفیت آب زیرزمینی گزارش شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.



شکل (۱۳) روش اعتبار سنجی متقابل به منظور ارزیابی روش کو کریجینگ ساده برای هدایت الکتریکی



شکل (۱۴) روش اعتبار سنجی متقابل به منظور ارزیابی روش کو کریجینگ ساده برای متغیر SAR

جدول (۳) شاخص های عملکردی مدل برای شاخص هدایت الکتریکی

R2	ϵ %	MAE	NRMSE	EF	CRM	RMSE
۰/۹۹	۳۴/۴۸	۳۸۳	۰/۰۷	۰/۹۳	-۰/۰۴۵	۴۶۳

جدول (۴) شاخص های عملکردی مدل برای شاخص SAR

R2	ϵ %	MAE	NRMSE	EF	CRM	RMSE
۰/۶۷	۸۹۴	۱۲	۰/۳۴	۰/۶۵	۰/۳۵	۱۷

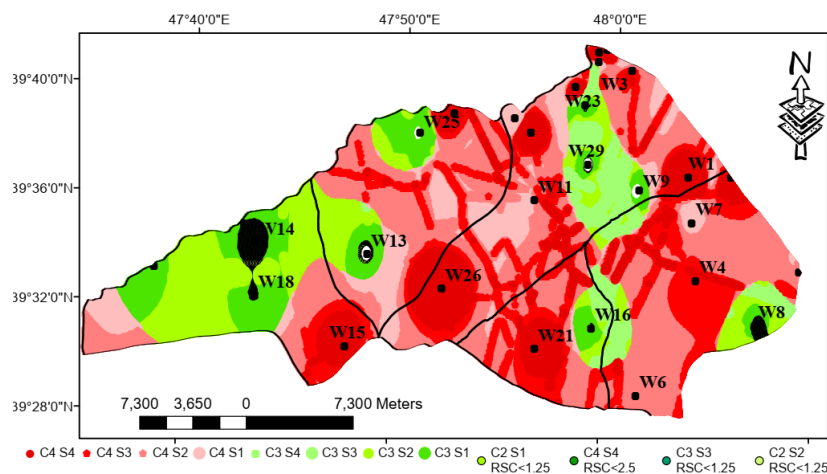
با روی هم گذاری نقشه های هدایت الکتریکی و مقدار SAR و همچنین مقادیر شاخص کربنات کلسیم باقی مانده نقشه نهایی کیفیت آب زیرزمینی منطقه تهیه شد که مطابق شکل (۱۵) است. همچنین جدول (۵) طبقه بندی مساحت دشت را بر اساس شاخص کیفیت ویلکاکس برای هر کلاس طبقه بندی نشان می دهد. بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت از نظر کشاورزی طبق نمودار ویلکاکس نشان می دهد، تقریباً یک درصد از آب های زیرزمینی دشت در ناحیه C2S1 قرار دارند که می تواند برای کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. باقی مناطق مورد مطالعه، از نظر شوری در سطح بالای قرار دارند که برای کشاورزی مناسب نیستند. از ۹۹ درصد باقیمانده، نزدیک به ۱۴ درصد، از نظر میزان سدیم نیز برای آبیاری مناسب نیستند. نواحی مناسب برای مصارف کشاورزی، نواحی نزدیک به چاه های W14، W18، W24، W16، W9 و W8 هستند که نزدیک به بخش های گوشلو و اولتان قرار دارند. مطالعه حاضر نشان داد که ادغام داده های مکانی با روش های زمین آماری مانند کوکریجینگ، به ویژه در برآورد متغیرهای مهمی چون هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم (SAR)، توانایی بسیار خوبی در تعیین کیفیت آب برای مصارف کشاورزی دارد. این یافته با نتایج مطالعه ای در تونس هم راستا است که با استفاده از کوکریجینگ، پراکندگی EC و کلرید در آبخوان را با دقت بالا مدل کردند و نواحی نامناسب برای آبیاری را شناسایی کردند (بن سعد^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، استفاده از شاخص های طبقه بندی کیفیت آب، مانند نمودار ویلکاکس در مطالعات جدید، نقش اساسی در ارزیابی تناسب آب برای آبیاری دارد. در مطالعه ای دیگر در آبخوان قزوین، محققان نشان دادند که تحلیل توزیع EC و SAR برای تعیین کیفیت آب در مناطق مختلف ضروری است و تنها بخش محدودی از آبخوان در طول زمان شرایط مطلوب برای آبیاری را دارد (رحیمی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). این نتایج با مطالعه دشت مورد مطالعه هم راستا است، زیرا که بیش از ۹۹٪ از آب زیرزمینی دشت مغان نیز، در نواحی شور یا بسیار شور قرار گرفته و تنها حدود ۱٪ منابع برای کشاورزی مناسب هستند. اهمیت روش های زمین آماری در تحلیل های اخیر نیز مشهود است. مرور کاربرد این روش ها در مسائل شوری آب زیرزمینی نشان می دهد که کواریوگرام ها و تغییرنماها قادر به تحلیل ساختار فضایی داده ها و تعیین کمی عدم قطعیت ها هستند و به شناسایی دقیق نواحی با شوری بالا کمک می کنند (المصری^۳، و همکاران ۲۰۲۲). مطالعات اخیر نشان داده اند که ترکیب فناوری های GIS و روش های زمین آماری ابزار قدرتمندی برای ارزیابی تغییرات مکانی- زمانی کیفیت آب زیرزمینی فراهم می کند. در این چارچوب، افزایش برداشت از آبخوان ها در مناطق خشک و نیمه خشک منجر به افت سطح آب زیرزمینی و تشدید فرایندهای شوری و کاهش کیفیت آب می شود. نتایج پژوهش های جدید نشان می دهد که این برداشت بی رویه می تواند موجب افزایش غلظت یون های محلول، تغییر رخساره های هیدروشیمیایی و گسترش پهنه های آب نامناسب برای کشاورزی شود. همچنین مدل های ترکیبی زمین آماری و GIS می توانند الگوهای مکانی آلودگی و شوری را با دقت بالا شبیه سازی کرده و مناطق بحرانی را شناسایی کنند. در مناطق خشک، این اثرات به دلیل تبخیر بالا و محدودیت تغذیه طبیعی آبخوان ها شدیدتر بوده و روند تخریب کیفیت آب را تسریع می کند. بنابراین مدیریت پایدار برداشت و پایش مستمر کیفیت آب زیرزمینی برای جلوگیری از افت بیشتر منابع ضروری است (تاجبخشیان^۴، ۲۰۲۴). لذا به طور کلی می توان گفت ادغام شاخص های کیفیت آب، مانند SAR و EC با تکنیک های زمین آماری پیشرفته یک رویکرد مؤثر برای ارزیابی و مدیریت کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری است و می تواند مناطق با کیفیت مناسب را شناسایی کرده و برنامه ریزی بهره برداری پایدار از منابع آب را تسهیل کند.

1- Ben Saad

2- Rahimi

3- Almasri

4- Tajbakhshian



شکل (۱۵) ارزشابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص ویلکاکس و روش کوکریجینگ ساده

جدول (۵) درصد هر یک از کلاس های طبقه بندی ویلکاکس برای مصارف کشاورزی در کل محدوده

C1				C2				C3				C4			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
--	--	--	--	۱/۱	--	--	--	۱۹/۲۵	۱۲/۳۴	۱/۴۵	--	--	۱۳/۵۴	۱۰/۹۴	۴۱/۳۸

از منظر محیط زیستی، الگوی مشاهده شده در توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی نشان می دهد که استمرار روند فعلی بهره برداری و افزایش شوری می تواند پایداری اکوسیستم های کشاورزی منطقه را با چالش جدی مواجه سازد. افزایش هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم، علاوه بر کاهش کیفیت آب آبیاری، موجب افت تدریجی کیفیت خاک، کاهش نفوذپذیری، تخریب ساختمان خاک و محدود شدن رشد گیاهان می شود. همچنین تجمع املاح در لایه های سطحی و زیر سطحی خاک، در بلندمدت خطر کاهش حاصلخیزی و گسترش اراضی با محدودیت کشاورزی را افزایش می دهد. با توجه به وابستگی اقتصادی منطقه به فعالیت های کشاورزی، اجرای برنامه های پایش مستمر کیفیت آب، مدیریت برداشت از آبخوان، بهبود راندمان سامانه های آبیاری و کنترل ورود آلاینده های کشاورزی و صنعتی ضروری به نظر می رسد. به کارگیری رویکردهای تلفیقی مبتنی بر GIS، زمین آمار و سامانه های تصمیم یار نیز می تواند در شناسایی پهنه های بحرانی و تدوین راهکارهای سازگار با محیط زیست نقش مؤثری ایفا کند.

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که به کارگیری روش های زمین آماری به ویژه کوکریجینگ ساده، ابزار مؤثری برای تحلیل و پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی در دشت مغان فراهم می کند. دقت بالای برآورد هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم بیانگر آن است که ساختار فضایی متغیرهای کیفی آب از انسجام قابل قبولی برخوردار بوده و می توان با اطمینان مناسبی کیفیت آب را در نقاط نمونه برداری نشده پیش بینی کرد. تحلیل تغییرنماها نیز نشان داد که مؤلفه ساختاری سهم غالبی در تغییرات مکانی پارامترها دارد که این امر قابلیت اعتماد مدل های برآوردی را تقویت می کند. پهنه بندی کیفیت آب بر اساس شاخص ویلکاکس نشان داد که بخش عمده ای از آب زیرزمینی منطقه در کلاس های شور و بسیار شور قرار دارد و تنها محدوده محدودی از دشت از نظر شوری و خطر سدیمی برای آبیاری مناسب است. این وضعیت بیانگر فشار قابل توجه بر منابع آب زیرزمینی و محدودیت جدی در توسعه پایدار کشاورزی منطقه است. روند افزایشی شوری در برخی نواحی می تواند ناشی از عوامل زمین شناسی، انحلال سازندهای تبخیری، الگوی جریان آب زیرزمینی و

همچنین برداشت بی‌رویه منابع آب باشد. بر این اساس، مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی در دشت مغان مستلزم پایش مستمر کیفی، کنترل برداشت، بهبود روش‌های آبیاری و استفاده از الگوهای کشت متناسب با کیفیت آب موجود است. ترکیب شاخص‌های کیفی آب با مدل‌های زمین‌آماری نه تنها امکان شناسایی نواحی بحرانی را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان ابزاری تصمیم‌یار در برنامه‌ریزی منابع آب و کاهش مخاطرات ناشی از شوری و سدیمی بودن آب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، نتایج این تحقیق چارچوبی کاربردی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌دهد. همان‌طور که نتایج و آماره‌های ارزیابی نشان داد، روش زمین‌آماری در برآورد دقیق شاخص و بلکاکس نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌دهد؛ زیرا روش‌های زمین‌آماری، به همراه تخمین، مقدار خطای آن را نیز ارائه می‌دهند و به این ترتیب، نه فقط مقدار متوسط خطا محاسبه می‌گردد، بلکه می‌توان توزیع خطاها را در کل محدوده طرح محاسبه نمود. نتایج نشان داد که توزیع ناحیه‌ای عوامل موثر بر ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت از روند مشخصی پیروی کردند که برای برآورد این متغیرها، روند در راستای محورهای مختصات حذف گردید. همچنین، واریوگرام متغیرهای ناحیه‌ای هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم از ساختار فضایی خوبی برخوردار بودند. همان‌طور که نقشه کیفیت آب زیرزمینی منطقه نشان داد، تقریباً ۹۹ درصد اراضی مورد مطالعه از نظر کیفیت در منطقه ضعیف قرار دارد و تنها یک درصد از آب زیرزمینی دشت از کیفیت خوب برای مقاصد کشاورزی برخوردار است. با بررسی کلی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم و همچنین کربنات کلسیم باقی مانده، به نظر می‌رسد از آنجا که شرایط بحرانی از نظر سدیمی بودن آب آبیاری اکثراً در اطراف چاه‌های W_1 ، W_2 ، W_{26} و W_{25} است که در مناطق جنوبی دشت و در بخش تازه کند قرار دارند، لذا برای جلوگیری از سدیمی شدن اراضی منطقه، می‌بایست بهره‌برداری از این چاه‌ها محدود گردد. همچنین، نتایج نشان داد که چاه‌های W_{23} ، W_{29} ، W_8 و W_{14} از نظر بهره‌برداری برای مقاصد آبیاری شرایط مناسب‌تری داشته و می‌توانند برای اهداف مدیریت بهره‌برداری مدنظر قرار گیرند. علاوه بر روش‌های زمین‌آماری در پایش منابع آب زیرزمینی، می‌توان در تحقیقات آتی به منظور پایش کیفیت آب زیرزمینی در فصول مختلف، از روش‌های هوش مصنوعی نیز بهره‌برد و نتایج آن را با روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار مورد مقایسه قرار داد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- ایزدی مهر، نسرین و ذوالفقاری، قاسم. (۱۴۰۳). پایش وضعیت کیفی آب زیرزمینی، با استفاده از شاخص IRWQIGC، مطالعه موردی: دشت فریمان، تربت جام. *پژوهش و فناوری محیط زیست*، ۱۶(۹): ۷۷-۹۱.
doi.org/10.61186/jert.46585.9.16.77
- ایمانی، بهرام و جعفرزاده، جعفر. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی قابل شرب روستایی با استفاده از تحلیل‌های زمین‌آمار و سامانه اطلاعات جغرافیایی-مطالعه موردی: شهرستان اردبیل. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*. ۳۲: ۱۵۱-۱۷۰.
doi.org/10.22131/SEPEHR.2023.562131.2906
- بهرامی‌نسب، رویا، پیرخراتی، حسین، عباسفام، علی‌رضا و شیخی، زهرا. (۱۳۹۸). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت رشکان به منظور استفاده از آن در کشاورزی. *اولین کنفرانس تحقیقات بنیادین در علوم کشاورزی و زیست محیطی*، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.
- پاشایی‌فر، محمدرضا، دهقان‌زاده، رضا، رضانی، محمدابراهیم، رفیعیان، امید و نجایی، آرزو. (۱۴۰۲). ارزیابی وضعیت، فرایندها و

- منابع ژئوشیمیایی آبخوان با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی، روش های گرافیکی و تحلیل های آماری چند متغیره- مطالعه موردی: دشت شبستر. فصلنامه علمی مهندسی منابع آب، ۱۶(۵۶): ۱۵-۳۰. doi:10.30495/wej.2023.28012.2315
- حشمتی، سمیرا و بیگی هرچگانی، حبیب الله. (۱۳۹۱). الگوهای تغییرات مکانی و پهنه بندی شاخص های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد به منظور کاربرد در طراحی سامانه های آبیاری قطره ای، پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران. حسنعلی پور، یوسف، مصطفی زاده، رئوف، اسمعیل عوری، اباذر، احمدی، محمد و ایمانی، رسول. (۱۴۰۱). ارزیابی اثرات توسعه شهری اردبیل بر کمیّت و کیفیت آبهای سطحی و زیرزمینی دشت اردبیل. مطالعات علوم محیط زیست، ۷(۳): ۵۳۷۴-۵۳۸۵. doi:10.22034/jess.2022.343220.1792
- سالاری، مرجان. (۱۴۰۲). بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص های کیفیت آب جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: دشت شیراز). مطالعات علوم محیط زیست، ۸(۴): ۷۵۷۶-۷۵۸۴. doi:10.22034/jess.2023.3808461953
- شیروانی، توران، شیروانی سارویی، ایمان، بوچانی، محمدحسین و عارف، فرشید. (۱۳۹۴). ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت صحرای باغ برای مصارف کشاورزی و صنعت. اکوهیدرولوژی، ۲(۴): ۳۴۵-۳۵۶.
- قربانی، اکرم، ادیبی نیا، محمدجواد، ناصری، عاطفه و مسعودی، حسن. (۱۴۰۳). ارزیابی و پهنه بندی کیفیت چاه های آب شرب شهرستان تربت جام و صالح آباد براساس شاخص WQI و نرم افزار GIS. پژوهش و فناوری محیط زیست، ۱۵(۹): ۱۸۵-۱۹۹. doi:org/10.61186/jert.41903.9.15.199
- قره محمودلو، مجتبی و زارع، علی. (۱۳۹۷). بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت سیدان- فاروق برای مصارف کشاورزی. دومین همایش ملی دانش و فناوری علوم کشاورزی. منابع طبیعی و محیط زیست ایران.
- ملکیان، آرش و میردشتوان، مهسا. (۱۳۹۴). بررسی کیفیت آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی بر اساس تحلیل های زمین آماری (مطالعه موردی: دشت هشتگرد استان البرز). نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۶۸(۴): ۸۰۹-۸۲۰. doi:org/10.22059/jrwm.2015.56961
- محمدیاری، فاطمه، توکلی، مرتضی و اقدر، حسین. (۱۳۹۴). ارزیابی و پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی مناطق مهران و دهلران از لحاظ کشاورزی با روش های زمین آمار. علوم و مهندسی آبیاری. ۲(۴): ۷۱-۸۳. doi:10.22055/jise.2016.12497
- میرشکاری، مصیب، طباطبایی، محمود و محمدی، حمیدرضا. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات کیفی آب های زیرزمینی دشت سیدان - فاروق برای مصارف کشاورزی، صنعتی و آشامیدنی. همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، ۸ اسفندماه، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- نخعی، محمد و ودیعتی، میثم. (۱۳۹۲). کاربرد مدل استنتاج فازی در ارزیابی کیفیت آب قنات جهت مصارف شرب و کشاورزی (استان تهران). مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته. ۲(۴): ۴۴-۵۲.
- نخعی نژادفرد، سارا، زهتابیان، غلامرضا، ملکیان، آرش و خسروی، حسن. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات زمانی و مکانی کمیّت و کیفیت آب های زیرزمینی دشت سرایان در خراسان جنوبی. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۴(۲): ۲۶۷-۲۷۸. doi:org/10.22092/ijrdr.2017.111885
- Agyare, W. A., Park, S. J., & Vlek, P. L. G. (2007). Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone Journal*, 6(2), 423-431.
- Almasri, M., Ahmed, F., & Khan, S. (2022). Geostatistical methods for groundwater salinity mapping: A review. *Journal of Environmental Management*, 321, 115957. doi:org/10.1016/j.jenvman.2022.115957
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (2020). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ben Saad, R., Haddad, M., & Trabelsi, S. (2024). Geospatial assessment of groundwater quality for irrigation using cokriging in central Tunisia. *Journal of Hydrology*, 634, 131395. doi:org/10.1016/j.jhydrol.2024.131395
- Castellini, M., Stellacci, A. M., Tomaiuolo, M., & Barca, E. (2019). Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in a durum wheat field: An assessment by the BEST-procedure. *Water*, 11, 1434. doi:org/10.3390/w11071434
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Guidelines for irrigation water quality*

- and soil management*. FAO.
- Hoseini, Y. (2023). Optimization of saturated hydraulic conductivity estimation using kriging in drainage networks. *Applied Water Science*, 13, 94–102. doi:org/10.1007/s13201-023-01897-3
- Hoseini, Y., & Kamrani, M. (2018). Using a fuzzy logic decision system to optimize the land suitability evaluation for a sprinkler irrigation method. *Outlook on Agriculture*, 47(4), 298–307. doi:org/10.1177/00307270187983
- Karimi, F., Sultana, S., Shirzadi Babakan, A., & Royall, D. (2018). Land suitability evaluation for organic agriculture of wheat using GIS and multi-criteria analysis. *Applied Geography*, 4(3), 326–342. doi:org/10.1080/23754931.2018.1448715
- Khairy, H., & Janardhana, M. R. (2022). Classification, hydrochemical characterization, and quality assessment of groundwater of coastal aquifer at Sari–Neka plain, Northern Iran. *Environmental Earth Sciences*. doi:org/10.1007/s12665-021-10115-9
- Merdun, H., Ozer, C., Meral, R., & Apan, M. (2006). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90, 108–116. doi:org/10.1016/j.still.2005.08.011
- Rahimi, A., Karimi, P., & Jafari, A. (2023). Evaluation of groundwater suitability for irrigation using spatial analysis and WQI in Qazvin Plain, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 564.
- Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2021). *Applied geostatistics with SGeMS: A user's guide*. Cambridge University Press.
- Santra, P., Chopra, U. K., & Chakraborty, D. (2008). Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm. *Current Science*, 95(7), 937–945.
- Suarez, D. L., Wood, J. D., & Lesch, S. M. (2022). Effect of sodium adsorption ratio and salinity on soil structure and infiltration. *Agricultural Water Management*, 264, 107492. doi:org/10.1016/j.agwat.2022.107492
- Tajbakhshian, M. (2024). Spatiotemporal assessment of groundwater quality and quantity using geostatistical and ensemble artificial intelligence tools. *Journal of Environmental Management*, 355, 120495. doi:org/10.1016/j.jenvman.2024.120495
- Turkish Statistical Institute. (2018). *Agricultural statistics summary*. <https://biruni.tuik.gov.tr/bolgeselistatistik/anaSayfa.do?dil=en>
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters* (USDA Circular No. 969). United States Department of Agriculture