

برآورد مکانی نسبت جذب سدیم (SAR) و میزان کلر آب زیرزمینی منطقه بوکان با استفاده از روش‌های زمین آمار

عزیزالله ایزدی^۱، مهدی دلقتندی^{۲*}، عبدالرحیم هوشمند^۳ و معصومه فراستی^۴

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز delghandi@gmail.com

۳- استادیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۲۰

چکیده

آگاهی از کیفیت آب زیرزمینی مناطق خشک و نیمه خشک می‌تواند در حفظ و تداوم پایدار این منبع ارزشمند نقش به‌سزایی داشته باشد. برای این امر، لازم است برآورد مکانی دقیقی از پارامترهای کیفی مؤثر در آب زیرزمینی مانند نسبت جذب سدیم و کلر انجام شود. امروزه استفاده از روش‌های زمین‌آمار برای برآورد متغیرهای مکانی با استفاده از داده‌های همان متغیر (کریجینگ) و یا به کمک متغیرهای کمکی (کوکریجینگ) مورد توجه متخصصین این حوزه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت اطلاع از وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و نیز هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری پارامترهای نسبت جذب سدیم و کلر، یافتن راهکاری برای برآورد آنها با استفاده از پارامترهایی که اندازه‌گیری آنها ساده‌تر است امری ضروری به نظر می‌رسد. این مطالعه روی ۸۰ نقطه در شهرستان بوکان و با استفاده از برآوردگر کوکریجینگ انجام گردید که در آن شوری آب (EC_w) به عنوان متغیر کمکی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از روش کوکریجینگ و کریجینگ برای برآورد نسبت جذب سدیم و کلر به کمک معیار آماری RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در برآورد میزان نسبت جذب سدیم، کوکریجینگ با RMSE برابر با ۳/۰۷، دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ داشت. هر چند که هر دو روش دارای دقت قابل قبولی بودند. در برآورد مقدار کلر نیز کوکریجینگ دقت بیشتری نسبت به کریجینگ داشت ($RMSE=3/82$).

کلید واژه‌ها: نسبت جذب سدیم، کلر، کوکریجینگ، آب زیرزمینی، بوکان.

مقدمه

و عدم قابلیت نفوذ آب در این نوع زمین‌ها، قدرت حاصلخیزی خاک‌ها آنچنان کاهش یابد که دیگر کشت و زرع در آنها امکان‌پذیر نباشد، به خصوص در نقاطی که آب شیرین برای آبیاری و آبشویی مداوم زمین وجود نداشته باشد (۱). هو و همکاران^۱ (۱۵) خشکسالی و افت سطح سفره آب زیرزمینی را از علل اصلی قلیایی و شور شدن خاک عنوان کردند. سدیم موجود در آب آبیاری روی پراکندگی ذرات، تخریب ساختمان خاک و در تولید محصول (گیاهانی مانند مرکبات، انگور و بعضی از درختان میوه) مؤثر می‌باشد (۱). در شرایط خشک ممکن است مقداری از یون‌های سدیم در آبیاری بارانی روی گیاه تجمع پیدا کرده و جذب گیاه گردد و ایجاد سمیت نماید. بنابراین سدیم یکی از عوامل اصلی تعیین کیفیت آب آبیاری محسوب

با افزایش بی‌رویه جمعیت و نیاز فراوان به غذا و از طرفی کمبود منابع آب سطحی جهت رشد گیاهان زراعی به‌ویژه در دهه اخیر، مساحت اراضی تحت آبیاری در کشور افزایش یافته است که این امر، سیاست استفاده از منابع آب و خاک را به کلی دگرگون کرده است. به طوری که این امر منجر به حفر تعداد زیادی چاه عمیق و نیمه عمیق در اکثر مناطق کشور شده است. لذا برداشت آب از سفره‌های آب زیرزمینی با نرخ زیادی رو به افزایش می‌باشد. این افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌تواند کیفیت آب در یک منطقه را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد و باعث شور شدن سفره‌های آب زیرزمینی گردد. مقدار نمک موجود در آب‌های زیرزمینی به منشأ آب و نیز به مسیری که آب آن را طی می‌کند، بستگی دارد (۶). در مواردی که آبیاری با آب محتوی املاح زیاد باشد و جنس خاک نیز ریز بافت و رسی باشد، امکان دارد به علت تراکم زیاد نمک در خاک

1. Hu et al.

بیان نمود. داگوستینو و همکاران^۲ (۱۱) با استفاده از روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ تغییرات مکانی و زمانی نیتراژ موجود در آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند و کوکریجینگ را روش دقیق‌تری جهت برآورد تغییرات این عنصر ارزیابی نمودند. دیک و هیولینک^۳ (۱۲) جهت تعیین الگوی بهینه نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه نوسانات سطح آب زیرزمینی از روش کریجینگ جهانی استفاده کردند. فینک و همکاران^۴ (۱۴) تغییرات سطح آب زیرزمینی کشور هلند را با برآوردگر رگرسیون کریجینگ و استفاده از نقاط کمکی حاصل از مدل رقومی ارتفاع، مورد بررسی قرار دادند و این روش را در بررسی تغییرات مکانی و نیز پایش سطح آب زیرزمینی مناسب معرفی کردند. مارنگو و همکاران^۵ (۱۷) به منظور تعیین چگونگی پراکندگی ۲۹ ویژگی شیمیایی و فیزیکی-شیمیایی در آب‌های زیرزمینی استان آلساندریای ایتالیا، ۴۴ نمونه آب را در کل منطقه به روش کریجینگ معمولی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که تفاوت معنی‌دار بین ترکیبات آب در روستاهای کوچک و نقاط پرجمعیت به دلیل آلودگی‌های مصنوعی وجود دارد. احمدی و صدق‌آمیز (۹) با استفاده از تکنیک کریجینگ، تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی را در ۳۹ چاه مشاهداتی منطقه داراب بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات عمق آب زیرزمینی در مکان‌های مختلف و در طول زمان زیاد است. احمدی و صدق‌آمیز (۱۰) به بررسی و ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در تعیین نقشه هم‌عمق آب‌های زیرزمینی دشت داراب پرداختند. نتایج نشان داد که عمق آب زیرزمینی در نقاط با آب و هوای مختلف تغییر می‌کند و روش کوکریجینگ نسبت به روش کریجینگ در تعیین نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی دقت بیشتری دارد. منطقه مورد مطالعه (منطقه بوکان) نیز از روند تهاجم به سفره‌های آب زیر زمینی مستثنی نبوده به طوری که در سال ۱۳۷۵ در کل منطقه جهت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی جمعاً نه حلقه چاه نیمه عمیق موجود بوده است (۳). براساس آمار سال ۱۳۸۶ جهاد کشاورزی شهرستان با گذشت ۱۱ سال تعداد چاه‌هایی که در منطقه جهت آبیاری مزارع حفر شده به ۲۴۱۵ حلقه چاه (۲۲۰۰ حلقه نیمه عمیق و ۲۱۵ حلقه عمیق) رسیده است. این رشد فزاینده هجوم به سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند در منطقه سبب معضلات بزرگی چه از لحاظ منابع طبیعی و بیابان‌زایی و چه از لحاظ منابع انسانی از جمله مهاجرت و بیکاری گردد. در این مطالعه با توجه به اهمیت میزان کلر و نسبت جذب سدیم و تأثیر آنها بر خاک و محصولات کشاورزی، به بررسی پراکندگی مکانی آنها و برآورد مقادیر این دو با استفاده از

می‌شود. برای بیان سدیم روش‌های متفاوتی نظیر درصد سدیم محلول (SSP)، شاخص نمک و استفاده از دیاگرام ویلکاکس وجود دارد (۵). معمول‌ترین روشی که برای ارزیابی اثر سدیم بر نفوذپذیری خاک و به عبارتی برآورد خطر سدیم در آب آبیاری به کار می‌رود، استفاده از نسبت جذب سدیم است که بر اساس طبقه‌بندی آزمایشگاه شوری ایالات متحده، اگر نسبت جذب سدیم ۱۰-۱۰۰ باشد درجه سدیمی کم است و اختلالی در خاک و گیاه ایجاد نمی‌کند و اگر ۱۸-۱۰ باشد درجه سدیمی متوسط بوده که استفاده از چنین آبی در اراضی سنگین رسی و لوم-رسی در دراز مدت خطرناک است و اگر ۲۶-۱۸ باشد درجه سدیمی شدید بوده و آبیاری با این آب مناسب نیست و چنانچه این میزان در دامنه ۳۰-۲۶ باشد درجه سدیمی خیلی شدید بوده و استفاده از این آب‌ها خطرناک و غیرمجاز است (۱).

کلریدها به عنوان آنیون‌های غالب و مؤثر در آب و محیط زیست موجودات زنده تأثیر دارند و از آنجایی که برخی از گیاهان به یون کلر حساسیت ویژه‌ای نشان داده‌اند و برخی دیگر در شوری‌های بالای آستانه کلریدی، کاهش عملکرد نسبی می‌دهند لذا ارزیابی آنها براساس کلر ضروری است. در مورد غلظت کلر موجود در آب آبیاری نیز روش‌های مختلفی نظیر وزن سنجی، روش حجمی با نیتراژ نقره (الکترومتریک) و حجم سنجی با معرف کرومات پتاسیم وجود دارد که نسبتاً هزینه‌بر و وقت‌گیر هستند. به منظور مدیریت بهتر منابع آب و خاک و برنامه‌ریزی صحیح جهت حصول عملکرد حداکثر در گیاهان زراعی، تعیین میزان عناصری نظیر سدیم و کلر در آب آبیاری ضروری به نظر می‌رسد (۱ و ۵). از آنجایی که برآورد میزان کلر و تعیین نسبت جذب سدیم و در نتیجه غلظت سدیم، کلسیم و منیزیم بسیار وقت‌گیرتر و هزینه‌برتر از اندازه‌گیری شوری آب است، یافتن راهکاری که بتوان از روی میزان شوری، میزان نسبت جذب سدیم و کلر آب را برآورد مکانی کرد، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. یکی از علومی که تغییرات مکانی و زمانی و نیز مدل‌سازی متغیرها را انجام می‌دهد، زمین آمار است. این علم شاخه‌ای از علم آمار است که تغییرات متغیر در محیط را به دو مؤلفه ساختاری و تصادفی تقسیم‌بندی می‌کند و علاوه بر کمیت یک نمونه، همزمان موقعیت فضایی آن را نیز در نظر می‌گیرد. در حالی که در آمار کلاسیک کل تغییرات به صورت تصادفی بوده و تغییرات وابسته به مکان در نظر گرفته نمی‌شود (۲، ۷ و ۸).

مطالعات زیادی در مورد بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است. دیلمن^۱ (۱۳) در آزمایش‌هایی که روی نمونه‌های آب چاه‌های مناطق تحت تأثیر املاح در عراق انجام داد، مقدار کلر موجود در آب‌های زیرزمینی را وابسته به هدایت الکتریکی

2. Dagostino et al.
3. Dick and Heuvelink
4. Finke et al.
5. Marengo et al.

1. Dieleman

می‌کنند. معادله نیم‌تغییرنما^۱ با فرض برقراری شرط مانایی^۲ به صورت زیر می‌باشد (۷):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i+h) - Z(x_i))^2 \quad (1)$$

که $\gamma(h)$ مقدار نیم‌تغییرنما در فاصله h مقدار $Z(x_i+h)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان (x_i+h) ، مقدار $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان (x_i) و $N(h)$ تعداد جفت مقایسه‌ها به فاصله h می‌باشد. هر نیم‌تغییرنما از سه پارامتر اثر قطعه‌ای، شعاع تأثیر و حد آستانه تشکیل شده است. مقدار نیم‌تغییرنما به ازای $h=0$ را اثر قطعه‌ای می‌گویند که معمولاً ناشی از وجود مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر است و در واقع با تصادفی بودن فرایندها و خطاهای نمونه‌برداری، آماده‌سازی، آزمایشگاهی و آنالیز ارتباط دارد. با افزایش h مقدار نیم‌تغییرنما تا فاصله معینی اضافه شده و سپس به حد ثابتی می‌رسد که این فاصله را شعاع تأثیر و مقدار نیم‌تغییرنمای ثابت را حد آستانه گویند (۲).

برآورد مکانی به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ

در روش‌های زمین‌آمار، برآورد براساس ساختار فضایی موجود در محیط مورد نظر صورت می‌گیرد. برآورد زمین‌آمار فرایندی است که طی آن مقدار یک کمیت در یک نقطه با مختصات مشخص با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم برآورد می‌شود. کریجینگ یک روش برآورد است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و بهترین برآوردگر خطی نارایب می‌باشد. در صورتی که $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان (x_i) باشد $Z(x_0)$ مقدار برآورد زده شده متغیر در نقطه (x_0) از ترکیب خطی زیر است:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

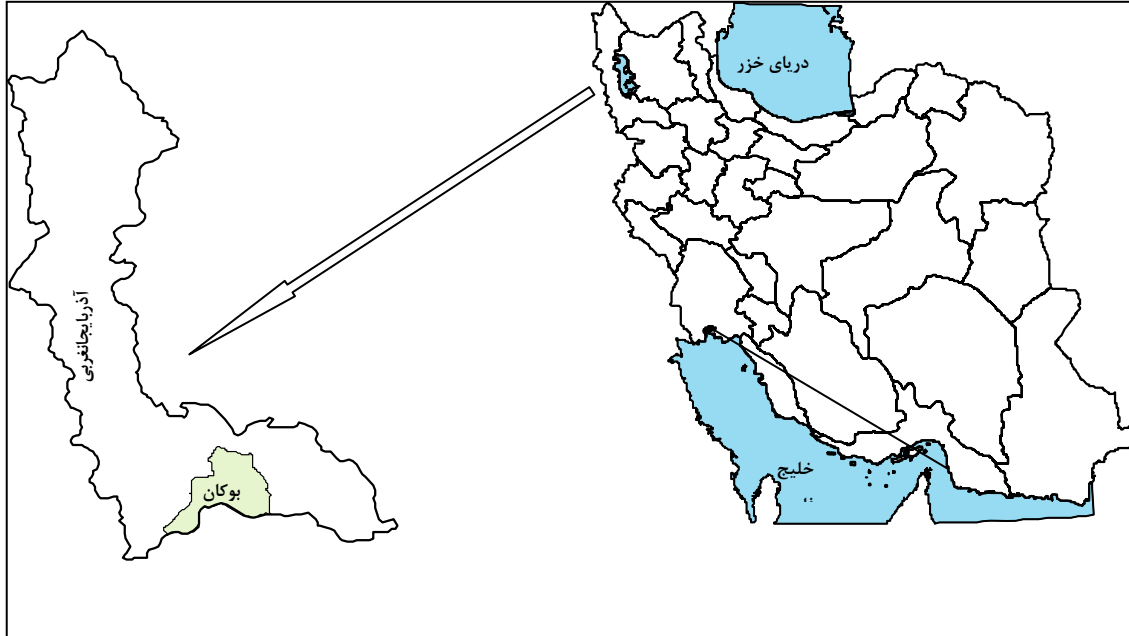
که λ_i وزن داده شده به متغیر X_i در نقطه i و n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده که برای برآورد همسایگی x استفاده می‌شود (۲ و ۱۶). این نوع کریجینگ را کریجینگ خطی می‌نامند زیرا ترکیب خطی از n داده است. شرط استفاده از این برآوردگر این است که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمایند. ثابت می‌شود که به منظور نارایب بودن رابطه (۲) می‌بایست مجموع وزن آماری نسبت داده شده به نمونه‌ها (λ_i) برابر یک باشد. از طرف دیگر رابطه واریانس

شوری آب پرداخته شده است. بدین منظور از دو برآوردگر کوکریجینگ و کریجینگ استفاده شده است و در نهایت کارایی دو این دو برآوردگر مورد ارزیابی قرار گرفته و گزینه برتر مشخص گردیده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه واقع در بوکان در جنوب استان آذربایجان- غربی در ۳۶ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۳ دقیقه طول شرقی با متوسط ارتفاع ۱۳۳۰ متر از سطح دریا واقع شده است که شامل دو دشت بوکان و دشت حاجی آباد به ترتیب به وسعت ۳۳۵۰۰ و ۱۳۸۰۰ هکتار می‌باشد. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. محصولات عمده زراعی منطقه، در کشت آبی گندم، چغندر، یونجه (به همراه اسپرس و شبدر) و جو و در کشت دیم گندم و جو می‌باشد. عمده‌ترین محدودیت اراضی قابل آبیاری در این منطقه عواملی نظیر خاک، توپوگرافی، ماندابی و شوری می‌باشد. سیمین‌رود پس از عبور از دشت بوکان وارد دشت حاجی‌آباد می‌شود و در جهت جنوب به شمال به جریان خود ادامه داده و از منطقه خارج می‌شود. منطقه مورد مطالعه جزو مناطق استپی سرد است که دارای زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های ملایم بوده و رژیم حرارتی مزیک و رژیم رطوبتی زیریک دارد (۴). در این مطالعه از ۸۰ چاه در سطح منطقه نمونه‌برداری انجام شد. طول و عرض جغرافیایی محل نمونه‌ها با GPS ثبت گردید. سپس در هر محل از آب چاه نمونه‌گیری و در ظرف پلاستیکی مشکی به آزمایشگاه منتقل گردید و مورد آنالیز قرار گرفت. سپس داده‌های مربوط به میزان سدیم، کلسیم، منیزیم (جهت محاسبه نسبت جذب سدیم) و کلر نیز شوری به دست آمد. روش‌های کوکریجینگ و کریجینگ برای برآورد پارامترهای نسبت جذب سدیم و کلر مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور از نرم افزارهای ArcGIS 9.2 و GS⁺ استفاده شد.

به منظور گسترش و تعمیم اطلاعات نقطه‌ای از روی نقاط نمونه‌برداری شده و نیز تغییرات مکانی و زمانی هر متغیر نیاز به مدل‌هایی است که بتواند متغیر مورد بررسی را در نقاط نمونه‌برداری نشده برآورد نماید. در برخی از مدل‌ها نظیر مدل‌های مختلف رگرسیونی، برآورد متغیر در نقاط نمونه‌برداری نشده صرفاً براساس مقادیر متغیر با فرض استقلال آنها صورت می‌گیرد. در مدل‌های زمین‌آمار جهت برآورد متغیرها در نقاط نمونه‌برداری نشده، موقعیت مکانی داده‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود و ارتباط بین داده‌ها به صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌گردد. برآوردگرهای زمین آماری مقادیر مجهول را با استفاده از مقادیر معلوم و یک نیم‌تغییرنما برآورد



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

برآورد به شکل زیر قابل استنتاج می‌باشد:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{oj} \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{ij} - \mu = C_{oj} \end{cases}, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (5)$$

$$\sigma_E^2 = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{oi} - \gamma_o - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \gamma_{oij} \quad (3)$$

این دستگاه معادله خطی را می‌توان به صورت حاصلضرب ماتریسی نوشته و از روش‌های ماتریسی دستگاه معادلات را حل نمود و ضرایب بهینه λ_i و ضریب لاگرانژ μ به دست آورد. همانند روش کریجینگ، اولین قدم در به کارگیری کوکریجینگ تعیین و مدل نمودن ساختار تغییرات مکانی متغیرهای مورد نظر است. در این حالت علاوه بر تعیین نیم‌تغییرنامه‌های متغیرهای اولیه و ثانویه به طور جداگانه، واریوگرام دوجانبه، که بیانگر ساختار همبستگی مکانی بین دو متغیر اولیه و ثانویه است، نیز بایستی محاسبه و ترسیم گردد. واریوگرام دوجانبه برای دو متغیر $Z_1(x)$ و $Z_2(x)$ ، رابطه و همبستگی بین این دو متغیر را به عنوان تابعی از فاصله h نشان می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)\} \{Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)\} \quad (6)$$

که در آن $N(h)$ تعداد جفت‌های $\{Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)\} \{Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)\}$ را نشان می‌دهد.

که در آن، σ_E^2 واریانس برآورد، λ_i وزن داده‌ها، γ_o مقدار نیم‌تغییرنا به ازای $h=0$ ، مقدار نیم‌تغییرنا بین نقطه مورد نظر و داده‌ها و γ_{oij} مقدار نیم‌تغییرنا بین نمونه‌ها می‌باشد. حال برای اینکه واریانس برآورد حداقل گردد لازم است تا تابع σ_E^2 بر حسب ضرایب کریجینگ (λ_i) حداقل شود که از روش ضریب لاگرانژ قابل حل می‌باشد. با در نظر گرفتن ضریب لاگرانژ μ باید n مشتق جزئی در معادله برابر صفر شود یعنی:

$$\partial \left[\sigma_E^2 - 2\mu \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] / \partial \lambda_i = 0 \quad (4)$$

که در آن $i=1, \dots, n$ است. رابطه فوق در حقیقت یک دستگاه معادلات خطی $n+1$ معادله، $n+1$ مجهولی است که با محاسبه مشتقات معادلات کریجینگ به صورت زیر حل می‌شود:

همسانگردی متغیرها و وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها را تشخیص داد (۲). جهت انجام آنالیز بر روی نیم‌تغییرنمای داده‌های نسبت جذب سدیم و کلر بعد از نرمال سازی، ابتدا نیم‌تغییرنمای هر کدام از متغیرها با نرم افزار GS⁺ رسم گردید و مدل مناسب برای برازش بر روی نیم‌تغییرنمای تجربی با توجه به مقدار RSS کمتر و میزان نسبت $C_0/(C_0+C)$ انتخاب گردید. این نسبت معرف آن است که چه مقدار از کل تغییر پذیری را اثر قطعه‌ای توجیه می‌کند (۲).

نتایج و بحث

برخی از خصوصیات آماری نظیر میانگین، انحراف از معیار، حداقل، حداکثر، ضریب تغییرات، چولگی، کشیدگی و دامنه تغییرات جامعه آماری (متغیرهای نسبت جذب سدیم و کلر) در جدول (۲) ارائه شده است. جهت آنالیز داده‌ها، برای هر کدام از متغیرهای مورد بررسی هیستوگرام ترسیم گردید که در شکل (۲-الف) آورده شده است. با توجه به هیستوگرام‌های ترسیم شده ملاحظه می‌گردد که هر دو متغیر نسبت جذب سدیم و کلر دارای چولگی بوده، بنابراین برای نرمال سازی داده‌ها از آنها لگاریتم گرفته شده و هیستوگرام متغیرها پس از نرمال شدن در شکل (۲-ب) قابل مشاهده است.

تجزیه و تحلیل زمین آماری

جدول (۳) پارامترهای واریوگرام برازش داده شده به داده‌های نسبت جذب سدیم و کلر را نشان می‌دهد. با توجه به معیار $C_0/(C_0+C)$ ، مدل گوسی برای هر دو متغیر بهترین مدل بود و به عنوان مدل برازش داده شده بر داده‌ها انتخاب گردید. برای استحکام ساختار فضایی یک متغیر از نسبت $C_0/(C_0+C)$ استفاده می‌شود و در واقع معرف آن است که چه مقدار از کل تغییرپذیری را اثر قطعه‌ای توجیه می‌کند. در صورتیکه $\frac{C_0}{Sill} \geq \frac{1}{2}$ باشد، نقش مولفه ساختاردار کمتر از بی‌ساختار است و در نتیجه می‌توان گفت که متغیر مورد بررسی از ساختار فضایی ضعیف برخوردار است. Sill آستانه نیم‌تغییرنمای می‌باشد که قبلاً توضیح داده شده است. نیم‌تغییرنمای تجربی و تئوری نسبت جذب سدیم و کلر در محیط GS⁺ تهیه شده و به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی فاصله بین زوج نقاط می‌باشد.

معادله کوکریجینگ با فرض وجود یک متغیر کمکی و یک متغیر اصلی به شرح زیر است (۲ و ۷):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} Z_2(x_j) \quad (7)$$

که $Z_2(x_i)$ متغیر مکانی کمکی یا ثانویه، $Z_1(x_j)$ متغیر مکانی اصلی، $Z(x_0)$ مقدار برآورد زده شده متغیر در نقطه (x_0) ، m و n به ترتیب تعداد جفت مقایسه‌ها برای متغیرهای کمکی و اصلی و λ_{1i} و λ_{2j} به ترتیب وزن‌های آماری اختصاص داده شده به متغیرهای اصلی و کمکی می‌باشد.

پس از به کار بردن روش‌های مذکور، برای ارزیابی از شیوه ارزیابی متقاطع به شرح زیر استفاده شد. ابتدا واریوگرام تجربی از روی اطلاعات برداشت شده ترسیم و واریوگرام تئوری بر آن برازش داده شد. هر بار در یک نقطه مقدار اندازه‌گیری شده حذف و از روی نقاط مجاور مقداری برای آن برآورد می‌گردد. سپس مقدار واقعی به محل قبلی برگردانده می‌شود و این عمل برای تمام نقاط دارای اندازه‌گیری تکرار می‌شود. جهت ارزیابی از ضریب تعیین R^2 به همراه معیار آماری ریشه دوم میانگین مربع خطا استفاده شد. مقدار R^2 بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بوده که مقدار آن بین صفر تا یک می‌باشد. هرچه مقدار R^2 به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده رابطه قوی‌تر خطی بین دو مقدار می‌باشد. معیار ضریب تعیین به تنهایی نمی‌تواند بیانگر عملکرد یک مدل در شبیه‌سازی داده‌ها باشد. بنابراین از RMSE به عنوان یک معیار معتبر در کنار R^2 مورد استفاده قرار گرفت:

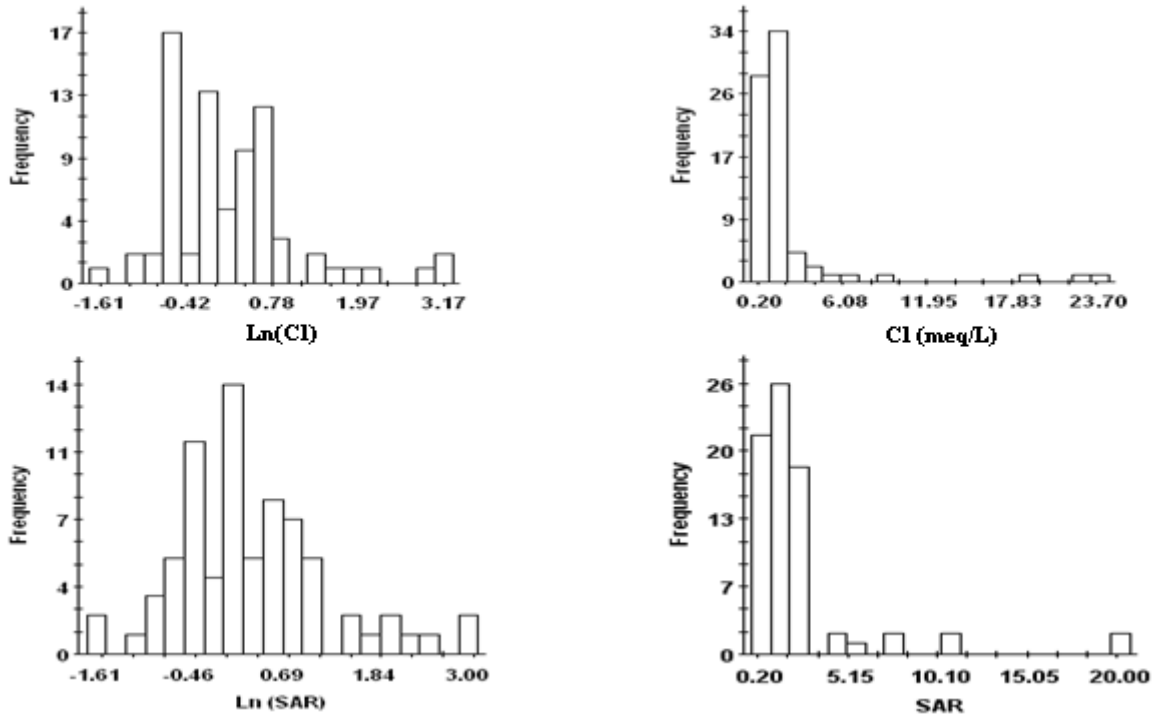
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z(x_{iS}) - Z(x_i))^2} \quad (8)$$

که $Z(x_{iS})$ مقدار برآورد شده در نقطه x_i ، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه x_i ، i شماره نقاط و n تعداد نقاط مشاهداتی می‌باشد.

به منظور بررسی همبستگی مکانی و ساختار مکانی متغیرها با استفاده از نرم افزار تخصصی GS⁺ نیم‌تغییرنمای داده‌ها مورد آنالیز قرار گرفت. با استفاده از نیم‌تغییرنمای می‌توان علاوه بر بررسی ساختار مکانی، شعاع همبستگی متغیرها، بررسی ایستایی داده‌ها،

جدول ۲- مقادیر پارامترهای آماری متغیرهای مورد بررسی

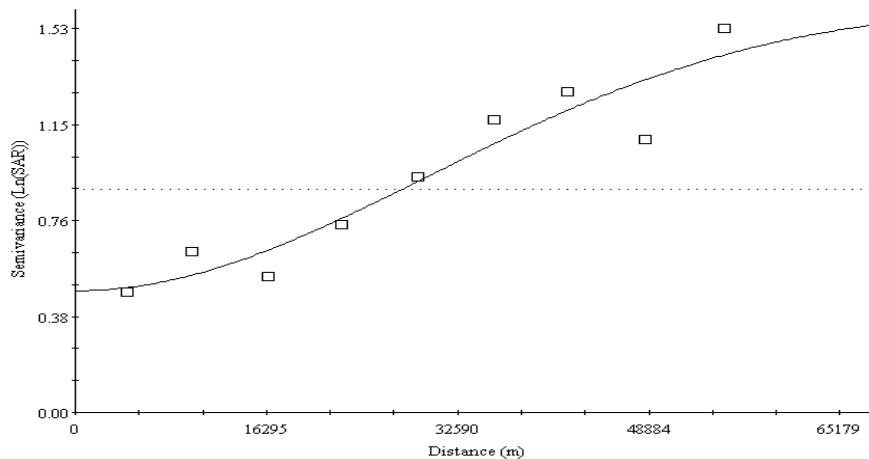
متغیر مورد بررسی	میانگین	حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	دامنه تغییرات
نسبت جذب سدیم	۲/۳۲	۰/۲	۲۰	۱/۵۴	۳/۵۸	۳/۶۴	۱۴/۰۱	۱۹/۸
کلر (meq/L)	۲/۲۷	۰/۲	۲۳/۷	۱/۸۹	۴/۳	۴/۰۶	۱۶/۰۷	۲۳/۵



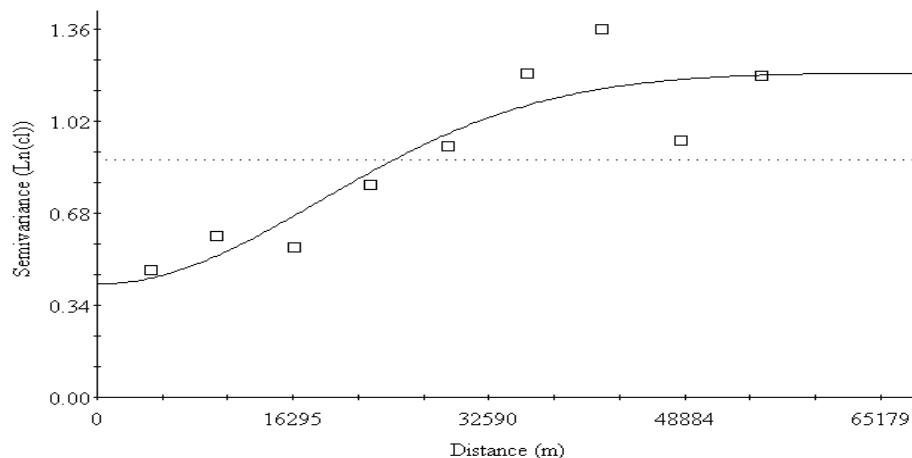
الف) قبل از تبدیل توزیع داده‌ها به نرمال
 ب) بعد از تبدیل توزیع داده‌ها به نرمال
 شکل ۲- هیستوگرام داده‌های نسبت جذب سدیم و کلر قبل و بعد از تبدیل توزیع داده‌ها به نرمال

جدول ۳- بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای تجربی نسبت جذب سدیم و کلر و پارامترهای مربوطه

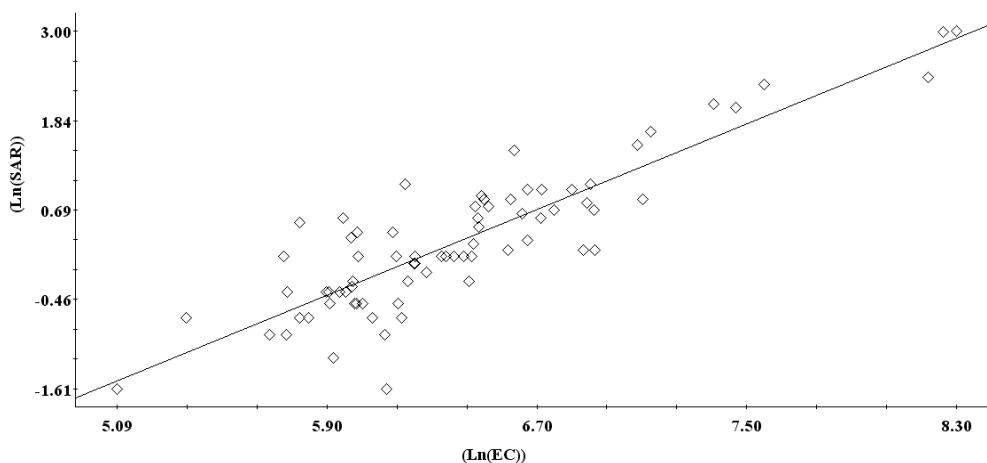
RSS	R^2	$C_0 / (C_0 + C)$	شعاع تأثیر (m)	آستانه	اثر قطعه‌ای	مدل	متغیر
۰/۱۰۳	۰/۹	۰/۲۸	۴۲۲۰۰	۱/۶۲۹	۰/۴۸۵	گوسی	نسبت جذب سدیم
۰/۱۳۸	۰/۸۳	۰/۳۵	۲۶۲۰۰	۱/۲	۰/۴۱۸	گوسی	کلر



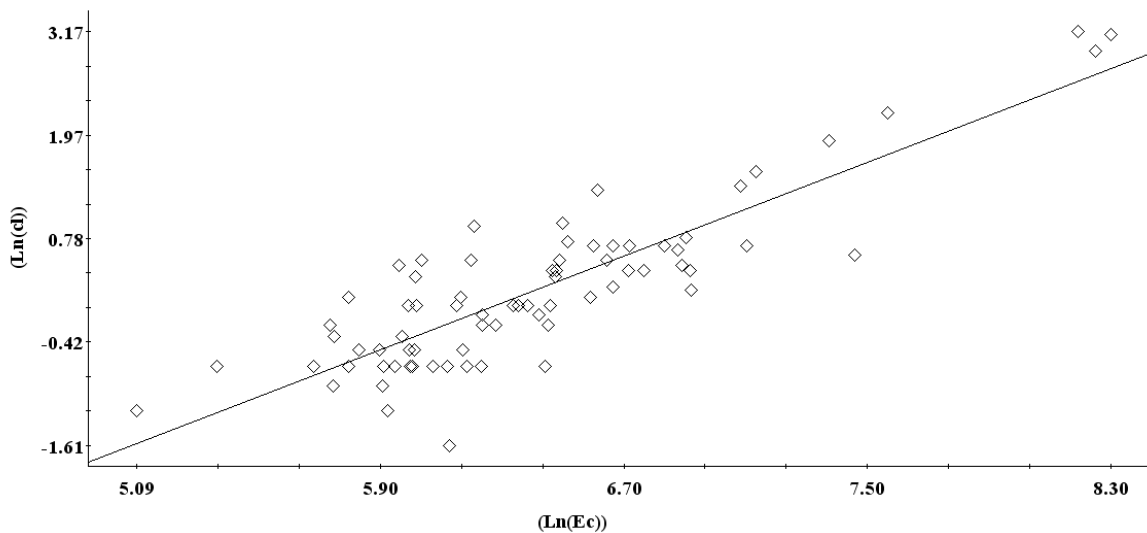
شکل ۳- نیم‌تغییرنمای تجربی و مدل تنوری برازش داده شده به نسبت جذب سدیم



شکل ۴- نیم تغییرنمای تجربی و مدل تئوری برازش داده شده به کلر



شکل ۵- نمودار همبستگی متغیر کمکی Ln(EC) با متغیر اصلی Ln(SAR)



شکل ۶- نمودار همبستگی متغیر کمکی Ln(EC) با متغیر اصلی Ln(Cl)

جدول ۴- میزان RMSE ارزیابی روش‌های کوکریجینگ و کریجینگ در برآورد نسبت جذب سدیم و کلر

پارامتر	کوکریجینگ	کریجینگ
نسبت جذب سدیم	۳/۰۷	۳/۱۵
کلر	۳/۸۲	۳/۸۹

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ جهت برآورد میزان نسبت جذب سدیم و نیز کلر آب زیرزمینی از داده‌های شوری آب زیرزمینی استفاده گردید. نتایج به دست آمده از روش کوکریجینگ با روش کریجینگ مقایسه گردید. برای داده‌های نسبت جذب سدیم و کلر مدل نیم تغییرنمای گوسی با داشتن حداقل RSS و نیز مقدار $C_0/(C_0 + C)$ کمتر از ۰/۵ به عنوان بهترین مدل برازش انتخاب گردید و شعاع تأثیر این مدل برای داده‌های نسبت جذب سدیم و کلر به ترتیب ۴۲۲۰۰ و ۲۶۲۰۰ متر تعیین گردید. با توجه به همبستگی بالای بین متغیرهای مورد مطالعه (بین SAR و EC: $R^2=0.77$ و بین CI و EC: $R^2=0.75$) استفاده از برآوردگر کوکریجینگ جهت برآورد نسبت جذب سدیم و کلر کاملاً منطقی است. با توجه به معیار آماری RMSE دقت روش‌های زمین آمار در برآورد پارامترهای کیفی آب زیرزمینی بسیار خوب ارزیابی می‌شود. نتایج نشان داد که روش کوکریجینگ دارای دقت بهتری در برآورد پارامترهای مذکور نسبت به روش کریجینگ می‌باشد. لذا می‌توان از این روش به عنوان ابزاری برای برآورد میزان نسبت جذب سدیم و نیز کلر آب زیرزمینی در مناطق با محدودیت داده استفاده نمود.

با توجه به اینکه برخی از پارامترها تحت تأثیر عوامل محیطی دیگر قرار می‌گیرند لذا با استفاده از برآوردگر کوکریجینگ می‌توان در صورت وجود همبستگی، این عوامل را در برآورد متغیر اصلی دخالت داد. با بررسی همبستگی متغیرهای مورد مطالعه مشاهده شد که همبستگی بالایی بین متغیرهای نسبت جذب سدیم و کلر با EC وجود دارد (بین SAR و EC: $R^2=0.77$ و بین CI و EC: $R^2=0.75$). لذا برآورد نسبت جذب سدیم و کلر از روی EC با استفاده از برآوردگر کوکریجینگ کاملاً منطقی خواهد بود. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب همبستگی بین نسبت جذب سدیم و EC و کلر و EC را نشان می‌دهند.

ارزیابی روش‌های زمین آمار

با توجه به معیار آماری RMSE مندرج در جدول (۴)، مشخص است که در برآورد میزان نسبت جذب سدیم کوکریجینگ با میزان ۳/۰۷ RMSE دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ داشت. هر چند که هر دو روش دارای دقت قابل قبولی بودند. در برآورد مقدار کلر نیز کوکریجینگ دقت بیشتری نسبت به کریجینگ داشت (RMSE=۳/۸۲).

منابع

- الیاس آذر، خ. ۱۳۸۱. اصلاح خاکهای شور و سدیمی (مدیریت خاک و آب). انتشارات جهاد دانشگاهی ارومیه، ۳۰۰ صفحه.
- حسینی پاک، ع. ۱۳۷۷. زمین آمار. انتشارات دانشگاه تهران.
- شرکت مهندسی مشاور جاماب. ۱۳۷۰. طرح جامع آب کشور، منابع آبهای زیرزمینی حوزه آبریز دریاچه ارومیه، وزارت نیرو، ۳۰۷ صفحه.
- عماری، پ. ۱۳۷۷. مطالعات اجمالی خاکشناسی و طبقه‌بندی ارضی منطقه بوکان (استان آذربایجان غربی). نشریه شماره ۱۰۲۷، وزارت کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
- غلامعلی‌زاده آهنگر، ا. ۱۳۸۱. کیفیت و ارزیابی کیفی آب آبیاری. نشر علوم کشاورزی، ۱۱۴ صفحه.
- کردوانی، پ. ۱۳۸۶. منابع و مسائل آب در ایران. جلد دوم، آب‌های شور، مسائل و راه‌های استفاده از آنها، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۳۷ صفحه.
- محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری. جلد دوم، آمار مکانی، نشر پلک، ۴۵۳ صفحه.

۸. محمدی، ج. ۱۳۷۸. مطالعه تغییرات مکانی شوری خاک در منطقه رامهرمز خوزستان (با استفاده از نظریه ژئواستاتستیک کوکریجینگ). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد سه، شماره یک، صفحات ۷-۱.

9. Ahmadi, S. H. and A. Sedghamiz. 2007. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129: 277-294.
10. Ahmadi, S. H. and A. Sedghamiz. 2008. Application and evaluation of kriging and co-kriging methods on groundwater depth mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138: 357-368.
11. Dagostino, V., Greene, E. A., Passarella, G. and M. Vurro. 1998. Spatial and temporal study of nitrate concentration in groundwater by means of coregionalization. *Environmental Geology*, 36: 285-295.
12. Dick, J. B. and B. M. Heuvelink. 2007. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138: 86-95.
13. Dieleman, P. J. 1962. Reclamation of salt-affected soils in Iraq. International Institute of Land Reclamation and Improvement, Pub. No. 5, Wageningen The Netherland.
14. Finke, P. A., Brus, D. J., Bierkens, M. F. P., Hoogland, T., Knotters, M. and F. D. Vries. 2004. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. *Geoderma*, 123: 23-39.
15. Hu, K., Huang, Y., Li, H., Li, B., Chen, D. and R. E. White. 2005. Spatial variation of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. *Environment International*, 31: 896-903.
16. Isaaks, E. and R. M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, 561 pp.
17. Marengo, E., Gennaro, C. M., Robotti, E., Maiocchi, A., Pavese, G., Indaco, A. and A. Rainero. 2008. Statistical analysis of ground water distribution in Alessandria Province (Piedmont Italy). *Microchemical Journal*, 88:167-177.