

توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک در خاک‌های شور و سدیمی دریاچه ارومیه با استفاده از روش کریجینگ و IDW

حسین رضازاده^{۱*}، پریسا علمداری^۱، سالار رضاپور^۲ و محمدصادق عسگری^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۷)

چکیده

ارزیابی کیفیت خاک به منظور مدیریت پایدار اراضی، نقش برجسته‌ای در تشخیص وضعیت مناطق دچار تخریب خاک به ویژه خاک‌های شور و سدیمی ایفا می‌کند. این مطالعه با هدف تعیین توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک (Soil Quality Index-SQI) در اراضی شور و سدیمی حاشیه دریاچه ارومیه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) انجام شد. بدین منظور، ۸۲ نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و ۲۴ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و فلزات سنگین خاک آنالیز شدند. شاخص کیفیت خاک با استفاده از دو رویکرد خطی و غیرخطی محاسبه شد. همچنین، حداقل مجموعه داده (Minimum Data Set – MDS) شامل ۸ متغیر هدایت الکتریکی (EC)، درصد سیلت، کربن آلی (OC)، چگالی ظاهری (BD)، کادمیوم (Cd)، رس، کربنات کلسیم (CaCO_3) و سرب (Pb) شناسایی شد که بیش از ۷۸٪ از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند. نتایج نشان دادند که شاخص کیفیت خاک در منطقه دارای تغییرپذیری مکانی متوسطی است و الگوی آن از غرب به شرق منطقه کاهش می‌یابد. مقایسه روش‌های درون‌یابی نشان داد که روش کریجینگ در مدل خطی و روش IDW در مدل غیرخطی دقت بیشتری دارند. همچنین، مدل کروی با دامنه تأثیر متغیر بین ۶۱۳۰ تا ۲۰۶۱۰ متر بهترین برازش را با سمیواریوگرام‌های تجربی داشت؛ بنابراین، استفاده از شاخص کیفیت خاک در کنار روش‌های زمین‌آماري ابزاری مؤثر برای شناخت تغییرپذیری مکانی خاک و برنامه‌ریزی مناسب در مدیریت اراضی شور و سدیمی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک، مجموعه کل داده‌ها، مجموعه حداقل داده‌ها، کریجینگ، وزن‌دادن عکس فاصله

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: p_alamdari@znu.ac.ir

مقدمه

ارزیابی کیفیت خاک یکی از رویکردهای مهم در مدیریت پایدار منابع خاکی به ویژه در مناطق دچار تخریب خاک مانند خاک‌های شور و سدیمی است. در این زمینه، استفاده از شاخص کیفیت خاک (Soil Quality Index-SQI) به عنوان یک ابزار مؤثر در ارزیابی وضعیت عمومی خاک، گسترش چشمگیری یافته است (۴ و ۱۹). در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های زمین‌آماري مانند کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) در تهیه نقشه‌های توزیع مکانی خصوصیات خاک افزایش یافته است (۵ و ۴۰). این روش‌ها با در نظر گرفتن همبستگی مکانی داده‌ها، دقت زیادی در تخمین ویژگی‌های خاک دارند. همچنین استفاده از مجموعه حداقل داده‌ها (Minimum Data Set – MDS) به منظور محاسبه شاخص کیفیت خاک در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است؛ چرا که می‌تواند بدون از دست دادن اطلاعات معنی‌دار، حجم داده‌ها را کاهش دهد و فرایند ارزیابی را تسهیل کند (۳۸)؛ اما بیشتر مطالعات قبلی تنها به کاربرد یک روش خاص (خطی یا غیرخطی) و یک مدل زمین‌آماري محدود شده‌اند و مقایسه جامعی بین روش‌های مختلف در خاک‌های شور و سدیمی وجود ندارد (۲۲ و ۳۹). این شکاف دانشی باعث می‌شود که انتخاب بهینه‌ترین روش برای نقشه‌سازی و مدیریت کیفیت خاک در مناطق شور و سدیمی دشوار باشد. استفاده از روش‌های زمین‌آماري در علوم خاک توسط پژوهشگران مختلفی به کار گرفته شده است. وائوکلین (۳۴) از روش‌های آمار کلاسیک و زمین‌آمار به منظور مطالعه تغییرات مکانی شن، سیلت، رس، آب قابل استفاده و رطوبت معادل مکش ۳۳ کیلوپاسکال استفاده کرد. نتایج نشان داد که وابستگی مکانی قوی بین شن و آب قابل استفاده وجود دارد. همچنین روش نیم‌تغییرنما این مطالعه نشان داد که شن دارای وابستگی مکانی با رطوبت معادل مکش ۳۳ کیلوپاسکال در فاصله ۴۲ متری بود. سید جلالی و همکاران (۳۲) در بررسی

توزیع مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نشان دادند که روش کوکریجینگ با استفاده از مقادیر رس به عنوان داده‌های کمکی در برآورد CEC از دقت بسیار بیشتری نسبت به کریجینگ معمولی برخوردار بوده است. در پژوهش انجام شده توسط افضل‌ی و همکاران (۱) به منظور نمایش تغییرات مکانی، از روش کریجینگ استفاده شد. با توجه به نتایج شاخص‌های ارزیابی، مدل کریجینگ از کارایی قابل قبولی در پهنه‌بندی تغییرات خصوصیات فیزیکی خاک برخوردار بود؛ اما شدت همبستگی مکانی زیاد بود و در همه مدل‌ها کمتر از ۰/۲۵ به دست آمد. نجفیان و همکاران (۲۶) به منظور بررسی اهمیت الگوهای مکانی ویژگی‌های حاصلخیزی خاک و سایر عوامل بیرونی برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی، مطالعه‌ای را در ۱۳۲ هکتار از اراضی مرودشت استان فارس انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده توسط این پژوهشگران، نیتروژن و پتاسیم همبستگی مکانی متوسط داشتند و دامنه ساختار مکانی برای فسفر قابل دسترس و نیتروژن کل بیشترین مقدار و به ترتیب برابر ۴۸۰ متر و ۴۲۹ متر بود. امینی و همکاران (۲) میزان کلر موجود در خاک را با استفاده از روش‌های زمین‌آماري برای منطقه‌ای در جنوب شرق اصفهان مدل‌سازی کردند. ایشان همچنین از میزان EC به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از متغیر کمکی دقت برآوردها را به طور چشمگیری افزایش داده است. مک براتنی و وبستر (۲۴) نقشه‌های جامع خصوصیات فیزیکی شیمیایی و زیستی خاک را با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، GIS و تکنیک سنجش از دور برای مناطق وسیعی از استرالیا تعیین کردند.

درباچه ارومیه به عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق رامسری ایران و یک اکوسیستم آبی - خشکی در دهه‌های اخیر با بحران‌های زیست‌محیطی متعددی مواجه شده است. یکی از مهم‌ترین تغییرات ایجادشده در این منطقه، افزایش شدید شوری و سدیمی شدن خاک‌هاست که به دلیل کاهش شدید

اشکال اراضی موجود در ناحیه مورد مطالعه اراضی پست است. بیشتر کاربری اراضی بایر بوده و این منطقه تنوع قابل توجهی از لحاظ زهکشی، اشکال زمین، شرایط خاک و فعالیت انسانی برخوردار نیست. بر اساس نقشه رژیم‌های حرارتی و رطوبتی خاک‌های ایران، منطقه مطالعاتی رژیم رطوبتی زیریک (Xeric) و رژیم حرارتی مزیک (Mesic) را به خود اختصاص داده است. مواد مادری خاک‌های این منطقه بر اساس نقشه‌های زمین شناسی ارومیه رسوبات کواترنر است. رسوبات کواترنر در دو سکوی دریاچه ارومیه گسترش زیادی داشته و سطح نسبتاً زیادی را زیر پوشش برده‌اند و بیشتر از جنس شن و ماسه ریز و درشت و رس سخت نشده تا نیمه سخت هستند.

نمونه‌برداری خاک و تجزیه نمونه‌ها

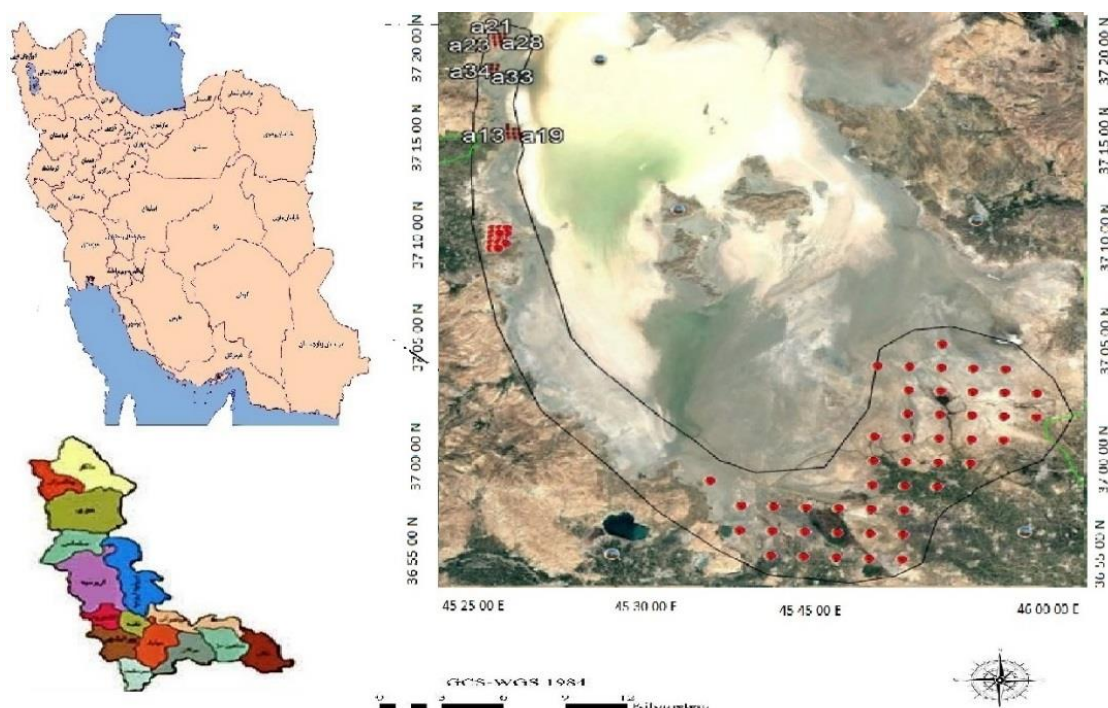
نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و به‌صورت شبکه بندی نامنظم برداشت شدند. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شامل شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری، پ هاش در گل اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه فلزی و کربن آلی به روش والکی- بالک انجام شد. ترکیب یونی خاک در عصاره اشباع خاک و سدیم قابل تبادل توسط استات آمونیوم نرمال تعیین شدند و سپس با استفاده از غلظت کلسیم، منیزیم و سدیم محلول و تبدیلی شاخص‌های نسبت سدیم جذبی (SAR) و درصد سدیم تبدیلی (ESP) خاک اندازه‌گیری شدند. کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خشتی‌سازی با اسید و پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم، کربنات کلسیم فعال به روش اگزالات آمونیوم فسفر قابل جذب به‌وسیله عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم و نیتروژن کل به روش کجلدال در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد (۳۰). شکل کل عناصر ریزمغذی و سنگین خاک شامل آهن، منگنز، روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل به روش هضم در اسید نیتریک غلیظ عصاره‌گیری شدند و غلظت آن‌ها نیز توسط دستگاه جذب اتمی مدل شیمادرو اندازه‌گیری شد (۲۷).

سطح آب دریاچه، افزایش تبخیر و بادهای شور رخ داده است (۴ و ۹). داده‌های موجود نشان می‌دهند که سطح آب دریاچه ارومیه از حدود ۶۰۰۰ کیلومترمربع در دهه ۱۳۸۰ به کمتر از ۷۰۰ کیلومترمربع در سال ۱۳۹۴ کاهش یافته و شوری آب دریاچه از ۱۴۰ dS/m به بیش از ۴۰۰ dS/m افزایش یافته و همچنین، در بیش از ۳۰ درصد از مناطق مطالعاتی $ESP > ۱۵$ گزارش شده است (۳۸). این نوع خاک‌ها به دلیل تخریب ساختار، کاهش نفوذپذیری و سمیت یونی، تهدیدی جدی برای کشاورزی و اکوسیستم‌های منطقه محسوب می‌شوند؛ بنابراین، ارزیابی کیفیت خاک در این منطقه نه تنها از منظر علمی، بلکه از دیدگاه مدیریت پایدار اراضی ضروری است. در این مطالعه، با استفاده از ۸۲ نمونه خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری و آنالیز ۲۴ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و فلزات سنگین، شاخص کیفیت خاک بر اساس دو رویکرد خطی و غیرخطی محاسبه شد. همچنین، دو روش زمین‌آماري کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله IDW برای درون‌یابی و تهیه نقشه توزیع مکانی مورد مقایسه قرار گرفتند. هدف اصلی این مطالعه، ارائه یک رهیافت تلفیقی از مدل‌های خطی و غیرخطی محاسبه شاخص کیفیت خاک به همراه مقایسه دو روش زمین‌آماري کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله IDW در منطقه‌ای شور و سدیمی است تا بهترین روش برای نقشه‌برداری و مدیریت کیفیت خاک در مناطق مشابه شناسایی شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه:

محدوده مطالعاتی در استان آذربایجان غربی و بخش جنوبی دریاچه ارومیه بین طول‌های $۴۵^{\circ}۲۱'$ تا $۴۶^{\circ}۱۲'$ شرقی و عرض‌های $۳۶^{\circ}۵۳'$ تا $۳۷^{\circ}۳۴'$ شمالی و با وسعت ۱۲۰ هزار هکتار قرار دارد. بیشتر خاک‌های این منطقه به‌طور طبیعی تحت تأثیر شوری و سدیمی دریاچه ارومیه هستند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

تعیین شاخص‌های کیفیت خاک

شاخص کیفیت خاک به دو روش خطی و غیرخطی (L , NL) بر اساس مجموع حاصل ضرب مقادیر پارامترها در وزن هر پارامتر به وسیله معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$SQIw = \sum w_i N_i \quad (1)$$

که در آن w_i وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک، N_i نیز مقدار نمره تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی مد نظر است. برای محاسبه شاخص کیفیت خاک لازم است از توابع امتیازدهی استاندارد عضویت فازی استفاده شود (۲۲). در این روش برای هر ویژگی خاک، تابعی تعریف می‌شود که با استفاده از آن، مقادیر ویژگی مد نظر بین صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) نمره‌دهی شد.

تابع (۱) هرچه بیشتر بهتر

$$SL = \left(\frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right)$$

تابع (۲) هرچه کمتر بهتر

$$SL = \left(\frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \right)$$

که در آن SL امتیاز معیارها، X_i مقدار اندازه‌گیری شده برای هر معیار و $X_{\max}$ مقدار بیشینه متغیر خاک و $X_{\min}$ مقدار کمینه متغیر خاک هستند.

در توابع امتیازدهی غیرخطی از منحنی سیگموئیدی (معادله ۲) برای نرمال‌سازی و نمره‌دهی ویژگی‌ها استفاده شد (۲۶).

$$S(NL) = \frac{a}{\left(1 + \frac{X}{X_0} \right)^b} \quad (2)$$

که در آن $S(NL)$ نمره غیرخطی هر ویژگی است که در دامنه صفر تا یک متغیر است، X مقدار ویژگی انتخاب شده و X_0 مقدار میانگین هر ویژگی است. حداکثر مقدار a در این مطالعه به عنوان یک تعریف شد و توسط تابع به دست آمده بود. همچنین شیب معادله (۲) برای توابع "بیشتر بهتر است" و "کمتر بهتر است" به ترتیب $-2/5$ و $+2/5$ است (۳۳). برای انتخاب کمترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، در نرم‌افزار SPSS با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مؤلفه‌های اصلی (PC) و ارزش ویژه (EV) تعیین شد. ارزش ویژه، میزان واریانس تبیین شده به وسیله هر عامل را بیان می‌کند و یکی از ضوابط پرکاربرد در تعیین تعداد

شد. برای این منظور از نیم‌تغییرنما استفاده شد. در مرحله بعدی با استفاده از مؤلفه‌های موجود، تخمین متغیرها در نقاط نمونه‌برداری نشده انجام شد. برای مدل‌سازی نیم‌تغییرنما از نرم‌افزار GS+ استفاده شد. ویژگی‌هایی که دارای توزیع نرمال بودند، فرایند نرمال‌سازی داده‌ها انجام نشد. ولی اگر توزیع داده‌ها نرمال نبود، حتماً تبدیل داده‌ها انجام شد. سپس برازش مدل نیم‌تغییرنما بر داده‌های تبدیل یافته انجام شد. برای ارزیابی بهترین برازش مدل‌های تئوری (خطی، نمایی، کروی و یا گوسی) بر نیم‌تغییرنمای تجربی از آماره‌های مجموع مربعات باقیمانده RMSE و ضریب تبیین استفاده شد (۳۳). برای پهنه‌بندی توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک از روش کریجینگ معمولی و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) استفاده شد.

کریجینگ معمولی

بر پایه نتایج آمار توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری‌شده‌ای که توزیع فراوانی نرمال نداشتند، با تبدیل داده نرمال شدند و سپس الگوی تغییرات مکانی و درجه پیوستگی مکانی متغیرها با استفاده از نیم‌تغییرنما ارزیابی شد. در ابتدا نیم‌تغییرنمای تجربی به‌صورت معادله ۳ محاسبه شد (۱۶).

$$Y(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

در این معادله، $n(h)$ تعداد جفت نمونه‌های به‌کارگرفته‌شده در محاسبه سمیواریوگرام، و $Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$ به‌ترتیب مقادیر متغیر مکانی در نقاط نمونه‌برداری x_i و $x_i + h$ هستند. پس از به‌دست‌آوردن نیم‌تغییرنمای تجربی مناسب‌ترین مدل بر نیم‌تغییرنمای تجربی برازش و اثر قطعه‌ای و دیگر ویژگی‌های زمین‌آمارای تعیین شد (۲۱). روش کریجینگ معمولی تخمین‌زنی است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری‌نشده به‌صورت ترکیب خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد (۱۵). معادله ۴ رابطه تخمین در روش کریجینگ معمولی است که می‌تواند منجر به دستیابی به جواب‌های دقیق شود.

$$Z(x) = \sum_{i=1}^i \lambda_0 z(x_i) \quad (4)$$

عامل‌هاست. در تحلیل عاملی، ارزش ویژه برابر یک است؛ یعنی در تحلیل عاملی مؤلفه‌های اصلی که ارزش ویژه آنان کمتر از یک است، به‌عنوان عامل‌هایی هستند که از نظر آماری معنی‌دار نیست و باید از تحلیل کنار گذاشته شود. سپس در مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه بیشتر از یک، ویژگی با بیشترین ضریب بارگذاری انتخاب و ویژگی‌هایی با اختلاف ۱۰ درصد از بیشترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به‌عنوان کمترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. برای تعیین مناسب‌بودن داده‌ها برای PCA از ضریب KMO و برای اطمینان از وجود همبستگی بین متغیرها از آزمون بارتلت استفاده شد (۱۷).

تحلیل آماری داده‌ها

مهم‌ترین آماره‌های توصیفی شامل شاخص‌های موقعیت توزیع (میانگین)، شاخص‌های پراکنش و شکل توزیع (واریانس، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات) به کمک نرم‌افزار SPSS مشخص شدند. از آزمون معنی‌دار بودن چولگی و آزمون توزیع نرمال کولموگروف - اسمیرنوف برای تشخیص نرمال بودن داده‌ها استفاده شد؛ زیرا شرط استفاده از روش‌های توزیع مکانی مانند کریجینگ آن است که متغیر دارای توزیع نرمال باشد. پیش از استفاده از روش‌های درون‌یابی آمار مکانی برای هر متغیر، آزمون داده‌های پرت، روند و غیرهمسانگردی انجام شدند. برای یافتن داده‌های پرت و جداسازی آنها برای محاسبات نیم‌تغییرنما، داده‌هایی که در بیشتر یا کمتر از چهار برابر انحراف معیار قرار داشتند، به‌عنوان داده پرت در نظر گرفته شدند. بعد از این مرحله، بررسی وجود روند در هر متغیر نسبت به فواصل نمونه‌برداری در هریک از جهت‌های اصلی به‌طور جداگانه رسم و با استفاده از برازش مدل‌های خطی و درجه دو بررسی شدند.

بررسی تغییرات مکانی

برای تبدیل نقاط به پهنه دو مرحله واریوگرافی و تخمین وجود دارد. در مرحله اول، ساختار مکانی متغیر ناحیه‌ای مدل‌سازی

در این معادله $Z(x_i)$ و $Z^*(x)$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده و تخمین زده شده در نقاط x_i و x است.

روش وزن دادن عکس فاصله (IDW)

در روش وزن دادن عکس فاصله برای هر یک از نقاط، اندازه گیری وزنی بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول در نظر گرفته می شود. سپس این اوزان توسط توان وزن دهی کنترل می شود؛ به طوری که توان های بزرگ تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان های کوچک تر وزن ها را به طور یکنواخت تری بین نقاط همجوار توزیع می کنند. البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آن ها را در نظر می گیرد؛ یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند، دارای وزن یکسانی هستند. پایه روش وزن دادن عکس فاصله، وزن دهی بر اساس عکس فاصله تا نقطه تخمین است. به عبارت دیگر، وزن دهی بیشتر به نزدیک ترین نمونه ها و اختصاص وزن کمتر به نمونه هایی است که در فاصله بیشتر قرار گرفته اند. در این روش مقدار متغیر در نقاط نمونه برداری نشده از معادله ۵ مشخص شد.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i/d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i} \quad (5)$$

که در آن Z مقدار برآورد متغیر در نقطه نمونه برداری نشده، d_i فاصله نقطه نمونه برداری شده تا نقطه تخمین، N تعداد کل نمونه ها و m پارامتر توان فاصله است که تغییرات آن سبب قابلیت انعطاف روش وزن دادن عکس فاصله می شود (۲۱).

ارزیابی دقت مدل های زمین آماری

برای تعیین کارایی یک مدل و دقت آن، باید تعیین کرد که مقادیر برآورد شده به وسیله مدل تا چه اندازه به مقادیر مشاهده ای نزدیک است. به عبارت ساده تر چه میزان اختلاف بین مقادیر مشاهده ای و برآوردی وجود دارد. روش ها و آماره های موجود با بررسی و تجزیه و تحلیل این

خطاها، میزان و کارایی یک مدل را محاسبه می کنند. یکی از شاخص های آماری که برای ارزیابی مدل ها از آن استفاده می شود، ضریب همبستگی پیرسون است. شاخص های کمی دیگری مانند آماره های میانگین مربعات خطا RMSE و ضریب تبیین R^2 وجود دارد که می توان در برآورد دقت مدل از آن ها استفاده کرد (۲۳). کمترین مقدار ریشه دوم میانگین مربعات خطا برابر صفر است. علاوه بر تعیین بهترین مدل برای برازش به نیم تغییرنمای تجربی، از روش های میان یابی وزن دادن عکس فاصله IDW و کریجینگ به منظور بیان تغییرپذیری مکانی ویژگی های اندازه گیری شده استفاده شد. برای ارزیابی اعتبار مدل ها و برآوردهای زمین آماری، آماره های ضریب تبیین R^2 (معادله ۶) و میانگین مربعات خطا RMSE (معادله ۷) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z_{x_i}^0 - Z_{x_i}]^2}{\sum_{i=1}^n [Z_{x_i} - Z_{x_i} \alpha]^2} \quad (7)$$

که در آن n تعداد نمونه ها، $Z_{x_i}^0$ مقدار برآورد شده پارامتر، Z_{x_i} مقدار اندازه گیری شده پارامتر و $Z_{x_i} \alpha$ میانگین متغیر اندازه گیری شده هستند (۲۵).

نتایج و بحث

مشخصات کیفی خاک های محدوده پژوهش

بر اساس نتایج ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نمونه های اندازه گیری شده (جدول ۱)، وزن مخصوص ظاهری خاک ها در دامنه $1/42 - 1/52$ و میانگین $1/45$ گرم در سانتی متر مکعب قرار دارد که نشان می دهد بیشتر خاک های منطقه از لحاظ این ویژگی در کلاس متوسط ($1/3 - 1/6$) قرار دارند. توزیع اندازه ذرات سه گانه به گونه ای است که باعث ایجاد تنوع قابل توجهی از کلاس بافت خاک شده است و عمده این منطقه شامل کلاس بافتی لوم، لوم شنی و لوم سیلتی هستند. میزان pH خاک ها نیز

جدول ۱. توصیف آماری متغیرهای خاک

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	CV
% Sand	3.15	83.15	38.896	19.78	50.85
% Silt	4.15	74.15	41.944	16.87	40.22
% Clay	8.4	50.2	19.16	9.79	51.10
BD(g/cm ³)	1.42	1.52	1.45	0.02	1.38
pH	7.14	8.54	7.6	0.31	4.08
EC(ds/m)	6	159	66.075	56.36	85.30
OC%	0.2	0.94	0.545	0.14	25.69
% CaCo ₃	5.5	35	13.921	6.42	46.12
ACC%	1.52	3.23	2.049	0.36	17.57
CEC(cmol/kg)	11.69	29.77	16.562	4.07	24.57
%Total N	0.04	0.16	0.09	0.02	22.22
P (mg/kg)	4.25	62	6.901	6.28	91.00
K (mg/kg)	130.83	208.17	165.402	19.49	11.78
(eq/L) SAR	34.12	168.83	103.805	43.14	41.56
%ESP	32.91	101.89	63.624	13.32	20.94
%clay ratio	1.33	8.74	3.673	1.72	46.83
%SSI	0.65	4.98	1.767	0.91	51.50
Cd (mg/kg)	0.327	3.243	1.801	0.75	41.64
Cu (mg/kg)	13.15	36.825	22.067	5.85	26.51
Pb (mg/kg)	12.104	31.988	18.161	4.06	22.36
Zn (mg/kg)	20.266	114.375	52.765	23.46	44.46
Ni (mg/kg)	29.45	96.425	39.606	10.55	26.64
Fe (mg/kg)	19075	22400	20884.439	715.54	3.43
Mn (mg/kg)	306	770.5	435.543	85.47	19.62

علائم استفاده شده عبارتند از: Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، pH: سیدیتته خاک، EC: هدایت الکتریکی، CaCo₃ آهک کل، ACC آهک فعال، OC: ماده آلی، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، K: پتاسیم، P: فسفر، N: نیتروژن، SAR: نسبت جذب سدیم، ESP: درصد سدیم تبدلی، BD: جرم مخصوص ظاهری، clayratio: نسبت رس، SSI: شاخص پایداری، Cd: کادمیوم، Cu: مس، Pb: سرب، Zn: روی، Ni: نیکل، Fe: آهن، Mn: منگنز.

درصد کربن آلی و ازت کل به ترتیب در دامنه ۰/۰۴ تا ۰/۱۶ و ۰/۲ تا ۰/۹۴ درصد متغیر بود که نشان دهنده محدوده ضعیف برای هر دوی این پارامترهاست. میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۶ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بود که محدوده کلاس متوسطی (۲۵ < CEC < ۱۲) را نشان می‌دهد (۱۳). میانگین فسفر و پتاسیم خاک‌ها به ترتیب ۶/۹ و ۱۶۵ میلی گرم در کیلوگرم

بین ۷/۱-۸/۵ متغیر بوده که نشان دهنده ویژگی‌های قلیایی در این خاک‌ها بود. مقدار EC و نسبت جذبی سدیم (SAR) به ترتیب در دامنه ۶-۱۵۹ دسی‌زیمنس بر متر و ۳۴-۱۶۸ متغیر بود. همچنین میزان ESP خاک‌ها نیز در محدوده ۱۰۱-۳۲ درصد بود. این دامنه تغییرات شاخص‌های شوری و سدیمی خاک (EC, SAR, PH) و (ESP) از مشخصات تیپ خاک‌های شور - سدیمی هستند (۳).

در MDS وجود داشته باشد، شاخص کیفیت خاک می تواند به طور قابل قبولی بر اساس حداقل مجموع متغیرها ارزیابی و بررسی شود. یو و همکاران (۳۸) به منظور بررسی شاخص های کمی کیفیت خاک در مناطق نیمه خشک چین با استفاده از روش PCA، از بین ۱۳ ویژگی مورد مطالعه تنها سه ویژگی نسبت نیتروژن به فسفر، کربن آلی قابل استخراج با آب و کربن ناپایدار را به عنوان مجموعه MDS انتخاب کردند. جدول ۳ نتایج آزمون بارتلت و KMO را نشان می دهد. با توجه به اینکه نتایج مقادیر KMO بیشتر از ۰/۵ و در حدود ۰/۵۸ و آزمون بارتلت نیز در سطح ۰/۱ درصد معنی دار است، داده ها برای تجزیه به مؤلفه های اصلی و انتخاب حداقل ویژگی ها مناسب هستند؛ از این رو استفاده از MDS بدون از دست دادن اطلاعات معنی دار، فرایند ارزیابی کیفیت خاک را تسهیل کرده و حجم داده ها را تا ۷۰٪ کاهش داده است. این موضوع برای مطالعات منطقه ای که داده های گسترده ای در دسترس نیست، بسیار ارزشمند است.

در این مطالعه آزمون K-S، ضریب تغییرات و تحلیل چولگی و کشیدگی برای نرمال سازی داده ها استفاده شد. اما عدم استفاده از anisotropy یکی از محدودیت های مطالعه است.

تغییرات شاخص های کیفیت خاک

جدول ۴ وضعیت کیفیت خاک را در منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص کیفیت تجمعی SQI در کل ویژگی های SQI-TDS و حداقل ویژگی های SQI-MDS انتخاب شده خطی SQI-TDS-L، SQI-MDS-L و غیرخطی SQI-MDS-NL و SQI-TDS-NL نشان می دهد. با توجه به نتایج، این منطقه دارای طیف وسیعی از شاخص های کیفیت خاک است. همان گونه که ملاحظه می شود، مقدار شاخص کیفیت خاک مدل SQI-TDS-L در دامنه ۰/۵۳۲۴-۰/۳۷۵۴، مدل SQI-TDS-NL در دامنه ۰/۵۴۸۲-۰/۳۷۲۱، مدل SQI-MDS-L در دامنه ۰/۱۸۶۹-۰/۰۹۷۹ و در مدل SQI-MDS-NL در دامنه ۰/۲۰۸۴-۰/۱۱۸۱ قرار دارد. با توجه به مقادیر میانگین در شاخص های SQI-MDS-NL و SQI-MDS-L، روش استفاده از حداقل داده ها به ترتیب ۰/۱۴۱۴ و ۱/۱۶۱۹ و برای شاخص های

خاک بود و بیانگر این است که کلاس ضعیف برای فسفر و کلاس متوسط برای پتاسیم خاک بود (۱۴). شاخص های SSI $(1.72OC/silt+clay)*100$ و $CR (silt+clay)/clay$ که شاخص های مرتبط با تخریب خاک هستند، به ترتیب در دامنه ۰/۴-۶۵/۹۸۲ و ۱/۳۳-۸/۷۴ قرار داشتند. می توان چنین پنداشت که خاک های محدوده مطالعه به فرسایش و تخریب خاک حساسیت زیاد دارند (۲۸). دامنه غلظت عناصر سنگین خاک ها که شناسه مهمی از کیفیت و سلامت خاک هستند، بدین صورت است که ۲۰/۲ تا ۱۱۴/۴ میلی گرم در کیلوگرم برای روی، ۱۳/۲ تا ۳۶/۸ میلی گرم در کیلوگرم برای مس، ۰/۳۳ تا ۳/۲ میلی گرم در کیلوگرم برای کادمیم، ۱۲/۱ تا ۳۲ میلی گرم در کیلوگرم برای سرب و ۲۹/۵ تا ۹۶/۴ میلی گرم در کیلوگرم هستند. با این وجود بر اساس استانداردهای بین المللی (۲۰)، غلظت عناصر یادشده در همه نمونه ها کمتر از حد قابل آنها بود. البته با در نظر گرفتن ضریب تغییرات عناصر روی، کادمیم و سرب دارای تغییرات زیاد ($CV > 36\%$)، و مس و نیکل از پراکنش متوسطی ($CV \leq 36\%$) برخوردار بودند (۳۷). غلظت Cd ($0.33-3.2 \text{ mg/kg}$) و Pb ($12.1-32 \text{ mg/kg}$) در تمام نمونه ها کمتر از حد مجاز FAO ($Cd < 3 \text{ mg/kg}$ و $Pb < 100 \text{ mg/kg}$) بود. همچنین ضریب تغییرات Cd ($CV = 36\%$) و Pb ($CV = 38\%$) نشان از تغییرات زیاد این عناصر دارد. این مقادیر نسبت به Cu و Ni که دارای CV کمتری هستند، بیشتر متغیرند (۱۰).

مؤلفه های اصلی کیفیت خاک

همان گونه که در جدول ۲ دیده می شود، هشت ویژگی بیش از ۷۸ درصد از واریانس را تبیین می کنند و از این رو در مرحله بعد بایست ویژگی های یادشده انتخاب شود تا مجموعه (MDS) تشکیل شده و تعداد ویژگی ها کاهش یابد. در نهایت تعداد هشت ویژگی شامل Cd، $CaCo_3$ ، Clay، Pb، BD، OC، Silt و EC به عنوان مجموعه حداقل داده ها انتخاب شدند. کارلن و آندرس (۱۸) معتقدند در صورتی که حداقل پنج پارامتر

جدول ۲. تعداد مؤلفه‌ها، ارزش ویژه و درصد ارزش ویژه تجمعی و نتایج آنالیز اجزای اصلی

بار عاملی	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Sand	-0.878							
Silt	<u>0.953</u>							
Clay			<u>0.971</u>					
BD							<u>0.746</u>	
pH	-0.344	-0.122		-0.432				
EC		<u>0.767</u>						
OC		0.056			<u>0.975</u>			
CaCo3				<u>0.938</u>				
ACC			0.049	0.938				
CEC			0.963					
Total N					0.974			
P							0.668	
K		0.183						
SAR		0.735						
ESP	0.408							
clay ratio	0.648							
SSI								
Cd								<u>0.684</u>
Cu						0.615		
Pb						<u>0.745</u>		
Zn								0.523
Ni								
Fe								
Mn						0.721		

جدول ۳. تست بارتلت و K

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)		۰/۵۸۱
آزمون کرویت بارتلت	آماره کای اسکوار	۱۸۲/۸۵۸
	معنی‌داری	۰/۰۰۰۱

جدول ۴. وضعیت کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance
SQI-MDS-L	0.0979	0.1869	0.1414	0.01735530	0.0003
SQI-TDS-L	0.3754	0.5324	0.4664	0.03496611	0.001
SQI-MDS-NL	0.1181	0.2084	0.1619	0.02201444	0.0004
SQI-TDS-NL	0.3721	0.5482	0.4697	0.03741702	0.001

شاخص‌های SQI-TDS-L و SQI-TDS-NL کل داده‌ها به ترتیب ۰/۴۶۶۴ و ۰/۴۶۹۷ هستند.

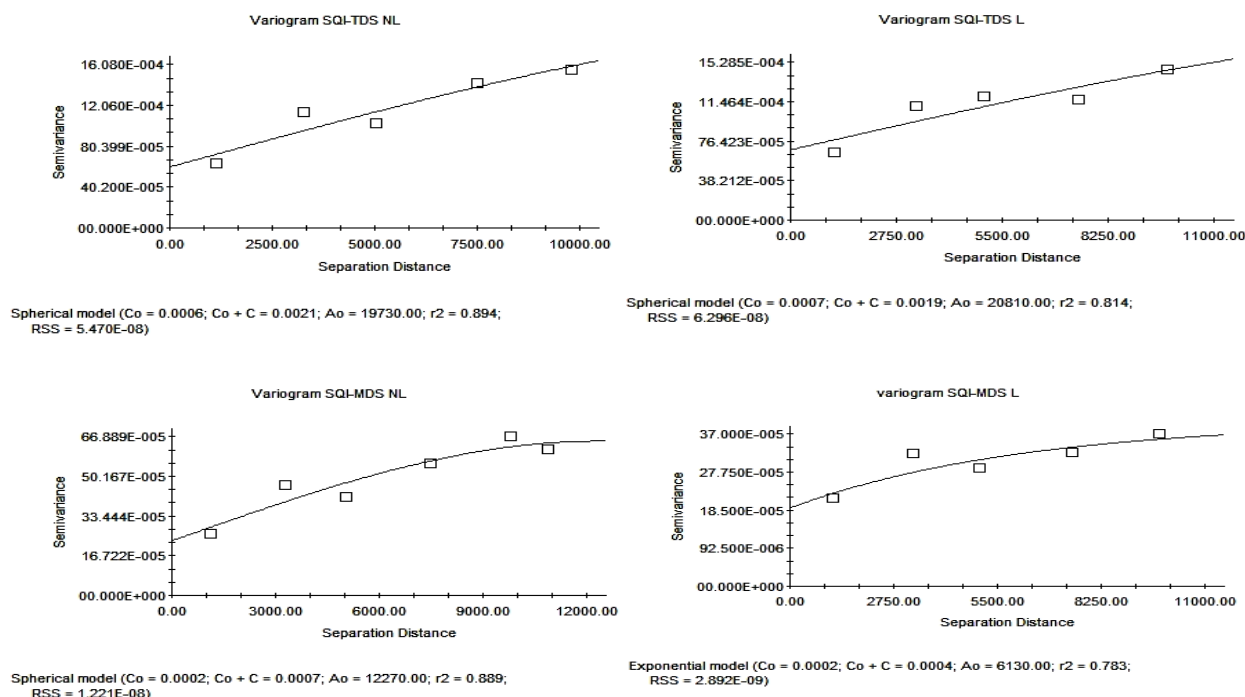
تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت خاک

نیم‌تغییرنمای تجربی منفرد شاخص‌های کیفیت خاک به طور جداگانه محاسبه و ترسیم شد (شکل ۲). برای انتخاب بهترین مدل نیم‌تغییرنما، معیارهای AIC، BIC و R^2 استفاده شدند. مدل کروی دارای کمترین AIC و BIC و بیشترین R^2 بود (۵). مدل کروی بر نیم‌تغییرنمای تجربی برازش داده شد. بیشترین دامنه برای شاخص کیفیت خاک مجموعه حداقل داده‌های غیرخطی (SQI-MDS NL) و برابر ۱۲۰۰۰ متر بود. این در حالی است که کمترین دامنه برای شاخص کیفیت خاک مجموعه حداقل داده‌های خطی (SQI-MDS L) و برابر ۱۱۰۰۰ متر دیده شد.

دامنه تأثیر، فاصله‌ای است که در بیش از آن، نمونه‌ها بر هم تأثیری ندارند و می‌توان آن‌ها را مستقل از هم فرض کرد. چنین فاصله‌ای حد همبستگی و ویژگی مد نظر را مشخص می‌کند و اطلاعاتی در رابطه با حد مجاز فاصله نمونه‌برداری ارائه می‌دهد. با توجه به جدول ۵ دامنه تأثیر متفاوتی را در شاخص کیفیت خاک می‌بینیم و کمترین دامنه تأثیر مربوط به شاخص کیفیت حداقل داده‌های خطی با ۶۱۳۰ متر و بیشترین دامنه تأثیر مربوط به شاخص کیفیت خاک کل داده‌های خطی با ۲۰۶۱۰ متر است. کرمی و بصیرت (۱۳) نیز بهترین مدل برازش داده‌شده را کروی گزارش کردند. جهت‌گیری فضایی داده‌ها با بررسی واریوگرام‌های جهت‌دار انجام شد. نتایج نشان داد که داده‌ها دارای همسانگردی نسبی هستند (۱۵). ویژگی‌های خاکی اندازه‌گیری‌شده، اثر قطعه‌ای کوچکی را نشان دادند. نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه شاخصی از قدرت ساختار متغیرهای مکانی است. اگر این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، متغیر از ساختار مکانی قوی و اگر نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد، ساختار مکانی آن متوسط و اگر این نسبت بیش از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی آن ضعیف خواهد بود. بنابراین ویژگی‌های SQI-TDS-NL و SQI-MDS-NL در

کلاس وابستگی مکانی قوی و پارامترهای خطی این مدل‌ها در کلاس وابستگی مکانی متوسط قرار می‌گیرند. قوی بودن ساختار مکانی ویژگی‌های مورد مطالعه بدان معنا است که استفاده از روش‌های زمین‌آماري به خوبی می‌تواند در تجزیه و تحلیل الگوی تغییرپذیری متغیرهای مورد مطالعه مفید واقع شود. وابستگی مکانی قوی ویژگی‌های خاک می‌تواند به خصوصیات ذاتی خاک (شکل‌گیری خاک) وابسته باشد؛ درحالی‌که وابستگی مکانی متوسط بیشتر به عوامل خارجی (روش‌های مدیریت خاک) نسبت داده می‌شود (۷). صحت تخمین نقشه پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک با روش‌های کریجینگ و وزن دادن عکس فاصله برای ویژگی‌های خاکی با استفاده از آماره‌های R^2 و RMSE اعتبارسنجی شد. در این ارتباط همان‌گونه که در جدول ۶ دیده می‌شود، داده‌ها نرمال هستند. بدین منظور مقادیر تخمین‌زده‌شده پارامتر مزبور با استفاده از این مدل‌های برازش داده‌شده بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده با آماره‌های مزبور محاسبه و بررسی شد (جدول ۷).

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که تخمین‌گر کریجینگ برای درون‌یابی پارامترها نتایج بهتر و خطای کمتری را نسبت به روش وزن دادن عکس فاصله ارائه داد. همچنان که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تبیین در مورد روش خطی به روش کریجینگ بیشتر از وزن دادن عکس فاصله است و در مورد روش غیرخطی عکس آن صادق است. حال آنکه در مورد میانگین مربعات خطا مقدار در مورد روش غیرخطی کمتر (هر چه کمتر بهتر) است و در مورد روش خطی روش وزن دادن عکس فاصله مقداری کمتر از روش کریجینگ است. کلیچاند و همکاران (۱۱) در زمینه شوری و قلیائیت خاک و کرسیس (۶) و برای کاربرد روش‌های میان‌یابی، در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ از روش‌های دیگر میان‌یابی دقیق‌ترند. ولتز و گولارد (۳۵) سه روش میان‌یابی نزدیک‌ترین فاصله، کریجینگ معمولی و کوکریجینگ را برای برآورد منحنی رطوبتی خاک ارزیابی



شکل ۲. سمیواریوگرام شاخص های SQI-TDS-NL، SQI-TDS-L، SQI-MDS-L، SQI-MDS-NL

جدول ۵. مدل های برازش داده شده بر نیم تغییرنمای تجربی منفرد و خلاصه ای از اطلاعات زمین آماری

مجموع مربعات خطا	ضریب تبیین	دامنه تأثیر (متر)	نسبت همبستگی مکانی	آستانه	اثر قطعه ای	مدل	فاکتور
۵/۴۷	۰/۸۱۴	۱۹۷۳۰	۰/۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۶	کروی	SQI-TDS NL
۶/۲۹۶	۰/۸۹۴	۲۰۶۱۰	۰/۲۷	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۷	کروی	SQI-TDS L
۱/۲۲۱	۰/۸۸۹	۱۲۲۷۰	۰/۲۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۲	کروی	SQI-MDS NL
۲/۹۲	۰/۷۸۳	۶۱۳۰	۰/۳۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	کروی	SQI-MDS L

جدول ۶. آزمون توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف در شاخص های کیفیت خاک

	SQMDSL	SQITDSL	SQIMDSNL	SQITDSNL
Mean	0.1415	0.4664	0.1620	0.4698
Std. Deviation	0.0173	0.0349	0.0220	0.0374
Test Statistic	0.063	0.067	0.078	0.085

جدول ۷. ارزیابی روش‌های مختلف میان‌یابی ویژگی‌های خاکی

vaRriable	interpolation	RMSE	R ²	Mean
SQI-MDSL	kriging	0.057	0.062	0.00067
	IDW	0.054	0.032	0.00077
SQI-MDSNL	kriging	0.0669	0.124	0.00034
	IDW	0.069	0.159	0.0029
SQI-TDSL	kriging	0.057	0.9	0.00007
	IDW	0.054	0.052	0.0018
SQI-TDSNL	kriging	0.0669	0.17	0.00015
	IDW	0.069	0.18	0.002

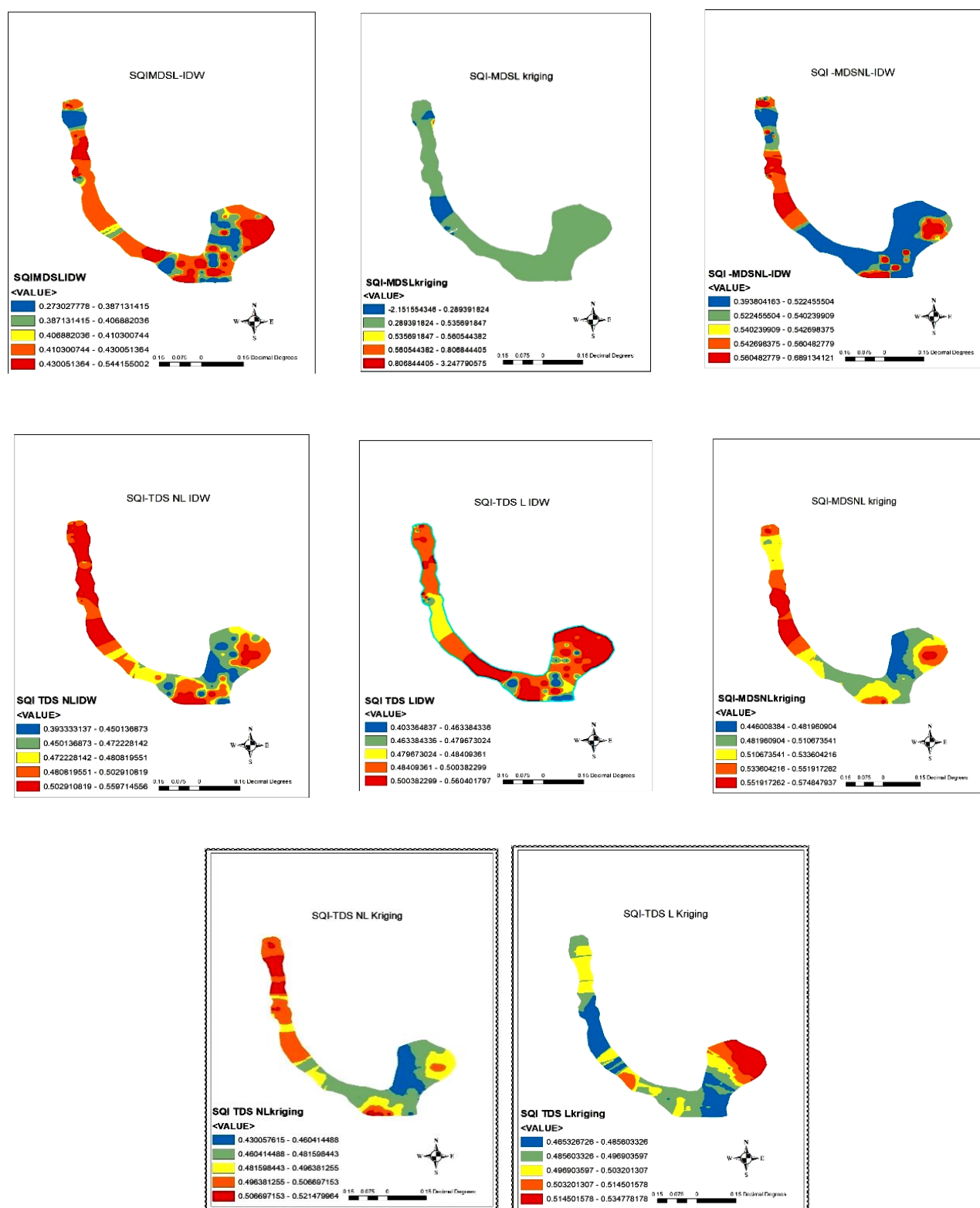
کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، کریجینگ و کوکریجینگ نتایجی بهتر از روش نزدیکترین فاصله داشته‌اند. ضریب تبیین R^2 شاخصی از تشریح تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل است و هر چه به عدد یک نزدیک باشد، نشانگر مناسب بودن نیکویی برازش توسط مدل است (۲۹). بر این اساس روش کل داده‌های خطی با مدل کریجینگ دارای تناسب بهتری است. رنجبر و همکاران (۳۱) با بررسی کیفیت خاک در منطقه قائن خراسان جنوبی نشان دادند که شاخص کیفیت تجمعی (SQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها مؤثرترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک در مزارع زعفران است. از این رو SQI-MDS-L با روش کریجینگ دارای بهترین دقت بوده و SQI-MDS-NL در مدل IDW دارای بهترین دقت است. تفاوت عملکرد کریجینگ و IDW ناشی از وابستگی مکانی و ساختار فضایی داده‌هاست. کریجینگ برای داده‌های با ساختار مکانی قوی مناسب‌تر است (۱۲).

توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک

با توجه به شکل ۳، نقشه‌های پهنه‌بندی به روش کریجینگ و وزن دادن عکس فاصله شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از روش‌های خطی و غیرخطی تهیه شد. کیفیت خاک متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. ویژگی‌های

شیمیایی جزء ویژگی‌هایی است که مقادیر آنها وابسته به عوامل مدیریتی است؛ از این رو روند تغییرات آنها لزوماً با روند تغییرات کیفیت خاک می‌تواند همخوانی نداشته باشد؛ ولی با توجه به تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به عنوان ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شده است. با توجه به نقشه‌های خروجی در مدل حداقل داده‌های خطی کریجینگ، مقادیر توزیع مکانی در کلاس متوسطی است. در حالی که برای همین مدل در روش وزن دادن عکس فاصله بیشتر مناطق در کلاس بالایی قرار دارد. همچنین توجه به نقشه‌ها نشان می‌دهد که بخش‌های غربی در مدل کل داده‌های غیرخطی وزن دادن عکس فاصله در کلاس کیفیت خاک زیادی قرار دارد؛ حال آنکه در مدل کل داده‌های خطی وزن دادن عکس فاصله بخش‌های جنوبی دارای کیفیت خاک در کلاس زیاد هستند.

در مورد روش کریجینگ نیز می‌توان گفت در مجموعه کل داده‌های غیرخطی در بخش‌های جنوب کلاس کیفیت خاک زیاد است؛ در حالی که همین بخش‌ها در روش خطی کریجینگ دارای کیفیت خاک کمی هستند. همچنین می‌توان چنین برداشت کرد که در روش وزن دادن عکس فاصله پراکنش زیادی در کیفیت خاک‌های محدوده مطالعاتی دیده می‌شود و لکه‌های زیادی با کیفیت متفاوت دیده شده است؛ ولی



شکل ۳. نقشه پراکنش کیفیت خاک به روش کریجینگ و وزن دادن عکس فاصله

در مورد روش کریجینگ چنین نبوده و اراضی مورد مطالعه دارای کیفیت متوسط بوده و فقط در قسمت شمال غربی محدوده بخش‌هایی دارای کیفیت زیاد دیده می‌شود. وولنهاپت (۳۶) دو روش وزن‌دهی عکس فاصله و کریجینگ را برای تهیه نقشه فسفر و پتاسیم در دو مزرعه مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که دقت نسبی روش کریجینگ بیشتر از روش وزن‌دهی عکس فاصله بود. بر اساس مطالعات دروگو و همکاران (۸) در مناطق مختلف و در مورد پارامترهای مختلف، نمی‌توان روش واحدی به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب کرد و انتخاب مناسب‌ترین روش درونیابی به خصوصیات منطقه‌ای نیز بستگی دارد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی جنوبی دریاچه ارومیه انجام شد. نتایج نشان داد که برای تهیه نقشه کیفیت خاک منطقه، شاخص کیفیت تجمعی با استفاده از حداقل ویژگی‌ها به روش غیرخطی مناسب‌تر است. بهترین مدل زمین‌آماري برآزش یافته بر

داده‌های مکانی شاخص‌ها مدل کروی با دامنه تأثیر ۲۰ کیلومتر است. کیفیت خاک در منطقه تحت تأثیر رس، سیلت، کربنات کلسیم، کربن آلی، چگالی ظاهری، هدایت الکتریکی، سرب و کادمیم است که بیش از ۷۸ درصد از واریانس کل را تبیین کردند و از غرب به شرق منطقه روند کاهشی دارد. کیفیت خاک متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. ارزیابی درجه تغییرپذیری مکانی شاخص کیفیت تجمعی نشان داد که شاخص‌های کیفیت خاک در منطقه دارای وابستگی مکانی متوسط هستند. همچنین نتایج نشان داد که کریجینگ در مدل خطی و IDW در مدل غیرخطی دقت بیشتری داشتند. در مطالعات آتی استفاده از داده‌های عمیق‌تر، تحلیل anisotropy و روش‌های هوشمند پیشنهاد می‌شود. با وجود عملکرد بهتر MDS در برخی موارد، در مجموع TDS دارای دقت بیشتری بود. این نشان می‌دهد که MDS می‌تواند در شرایط خاص مؤثر باشد؛ اما نمی‌تواند جایگزین کامل TDS شود. استفاده از MDS می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی اراضی شور و سدیمی به‌عنوان یک روش کارآمد مطرح شود.

منابع مورد استفاده

1. Afzali, A., V. Varwani and R. Jafarinia. 2018. Application of geostatistics technique in predicting spatial changes of soil texture (Case study: Farahan Plain, Central Province), *Geographical Quarterly* 15(58): 1- 16 (in Farsi).
2. Amini, M., M. Afyoni and H. Khademi. 2006. Modeling of mass balance of Cd and Pb in agricultural lands of Isfahan region. *Journal of Soil and Water Science* 10(4): 77 -90 (in Farsi). DOI: 20.1001.1.24763594.1385.10.4.6.7.
3. Andrews, S. S., D. L. Karlen and J. P. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems. *American Journal of Alternative Agriculture* 17(2): 105-113.
4. AghaKouchak, A., H. Norouzi, K. Madani and et al. 2015. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *International Journal of Climatology* 35(15): 416-433.
5. Bogunovic, I., P. Paulo Pereira and C. Brevik. 2017. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. *Science of the Total Environment* 584-585: 535-545
6. Cressis, N. 1991. Statistics for spatial data. John Wiley and Sons, New York.
7. Cambardella C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco and A.E. Koropaka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58(5): 1501-1511.
8. Drogue, G., J. Humbert, J. Deraisme, N. Mahr and N. Freslon. 2002. A statistical topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. *International Journal of Climatology* 22(5): 599-613.
9. Delju, A.H., A. Ceylan, E. Piguet and M. Rebetez. 2013. Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 111: 285-296.
10. FAO, 2008 , Guidelines for soil description.

11. Gallichand, J.D., D. Bouckland, D. Marcotte and M.J. Hendry. 1992. Spatial interpolation of soil salinity and sodicity for a saline soil in southern Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 72: 503-516
12. Goovaerts, 1997. Geostatistical tools for modeling and interpolation of spatially correlated data. *Journal of Hydrology* 228(1-2): 113-129.
13. Hazelton P. and B. and Murphy. 2016. Interpreting soil test results: What do all the numbers mean?. CSIRO publishing, Melbourne.
14. Haddad, M. and K. Lindner. 2001. sustainable water demand management versus developing new and additional water in the middle east: a critical review. *Water Policy* 3(2): 143-163.
15. Isaaks, E.H. and R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York.
16. Journel, A.G. and C.J. Huijbregts. 1978. Mining geostatistics, Academic Press. London.
17. Jolliffe, I. T. 1986. Principal components in regression analysis. PP. 129-155. In I. T. Jolliffe (Ed.), Principal component analysis. Springer, New York.
18. Karlen D.L., S.S. Andrews and J.W. Doran. 2001. Soil quality: current concepts and Lal, R, forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220(1-3): 317-333.
19. Karlen D.L. and D.E. Scott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. PP. 53-72. In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart. Defining soil quality for a sustainable environment, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison.
20. Kabata-Pendias A. 2010. Trace Elements in Soils and Plants. CRC press, Boca Raton.
21. Kravchenko, A., and D.G. Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91(3): 393-400.
22. Liu Z., W. Zhou, J. Shen, S. Li, P. He and G. Liang. 2014. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. *Soil and Tillage Research* 140: 74-81.
23. Mohammadi J., H. Khademi and M. Nael. 2005. Study the variability of soil quality in selected ecosystems of Central Zagros. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 9(3): 105-120 (in Farsi).
24. McBratney, A.B. and R. Webster. 1983. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil. *Journal of Soil Science* 34(1): 137-162.
25. Masto, R. E., P. K. Chhonkar, T. J. Purakayastha, A. K. Patra and D. Singh. 2008. Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi- arid sub-tropical India. *Land degradation and Development* 19(5): 516-529.
26. Najafian, A., M. Dayani, H. Motaghian and H. Nadian. 2012. Geostatistical assessment of the spatial distribution of some chemical properties in calcareous soils. *Journal of Integrative Agriculture* 11(10): 1729- 1737.
27. Nesbitt, H.W. and G.M. Young. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299(5885): 715-717.
28. Pieri, C.J.M.G. 1992. Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
29. Pham. H. 2019. A New Criterion for Model Selection. *Mathematics* 7(12): 1215. doi: 10.3390/math7121215
30. Rowell, D.L. 1994. Measurement of the composition of soil solution. PP. 112-124. Soil science: methods and application, Longman, Harlow.
31. Ranjbar, A., H. Emami, R. Khorasani and A.R. Karimi Karoyeh. 2016. Soil Quality Assessments in Some Iranian Saffron Fields. *Journal of Agricultural Science and Technology* 18(3): 865- 878.
32. Seyed Jalali, S.A.R., F. Sarmadian, Z. Mohammad Esmailc and V. Navidia. 2019. Assessment of spatial variability of cation exchange capacity with kriging and cokriging. *Desert* 24(1): 99-108.
33. Trangmar, B. B., R. S. Yost and G. Uehara. 1986. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy* 38: 45-94
34. Vauclin M. 1983. The use of Co-kriging with limited field soil observation. *Soil Science Society of America Journal* 47(2): 175-184.
35. Voltz, M. and M. Goulard. 1994. Spatial interpolation of soil moisture retention curves. *Geoderma* 62(1-3): 109-123
36. Wollenhaupt, N. C., R. P. Wolkowski and M. K. Clayton. 1994. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable rate fertilizer application. *Journal of Production Agriculture* 7(4): 441-448.
37. Wilding L.P. and L.R. Dress. 1983. Spatial variability and pedology. PP. 83-116. In: L.P. Wilding, N.E. Smeckand and G.F. Hall (Eds.). Pedogenesis and soil taxonomy. Concepts and interactions. Elsevier Science Publication, Amsterdam.
38. Yao R.J., J.S. Yang, X.F. Zhao, X.M. Li and M.X. Liu. 2013. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. *Soil and Tillage Research* 128: 137- 148.
39. Yao, R. J., J. S. Yang, X. F. Zhao, X. M. Li and M. X. Liu. 2020. Assessment of soil salinity and sodicity using minimum data set in the Yellow River Delta, China. *Ecological Indicators* 115: 106391.

40. Zhang, Y., I. Bogunovic and H. Li. 2021. Spatial mapping of soil chemical properties using multivariate geostatistics: A study from cropland in eastern Croatia. *Science Progress* 104(2): 003685042110074.