

ارزیابی روش‌های زمین‌آماری به‌منظور پهنه‌بندی ویژگی‌های حاصل‌خیزی خاک اراضی جنوب غرب شیراز با کاربری‌های مختلف

حمیدرضا اولیایی^{۱*}، علیرضا صالحی^۲ و غلامرضا زارعیان^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۸)

چکیده

آگاهی از توزیع مکانی ویژگی‌های خاک به‌عنوان عامل اساسی برای برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار در نظر گرفته می‌شود. روش‌های زمین‌آماری به‌طور گسترده‌ای به‌منظور تعیین تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک در نقاط ناشناخته استفاده می‌شود. این پژوهش به‌منظور ارزیابی روش‌های زمین‌آماری به‌منظور پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های حاصل‌خیزی منطقه دارنگان با کاربری‌های مختلف (زراعی - باغی و مرتعی) در جنوب غرب شیراز انجام شد. ۱۳۴ نمونه خاک سطحی با الگوی شبکه‌ای، از کاربری‌های مختلف برداشت و ویژگی‌های حاصل‌خیزی آن‌ها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بیشترین دقت، برای فسفر، نمایی ساده، پتاسیم و آهن، J-Bessel، کلسیم و منگنز، مدل Stable، نیتروژن و منیزیم، چندوجهی کروی و روی مدل گوسی و مس، مدل منطقی درجه دوم بوده‌اند. ساختار مکانی برای روی، ضعیف، برای نیتروژن، پتاسیم و منگنز متوسط و برای سایر متغیرها قوی برآورد شد. بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی، ۲۸، ۹۶ و ۲۴ درصد از اراضی مورد مطالعه به‌ترتیب با کمبود نیتروژن، فسفر و پتاسیم مواجه هستند. در ارتباط با عناصر ریزمغذی نیز ۷۸ و ۶۳ درصد از اراضی به‌ترتیب دارای کمبود آهن و روی هستند. مقایسه آماری ویژگی‌های مطالعه‌شده بیانگر تفاوت معنی‌دار مقادیر فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، کلسیم، منیزیم و ظرفیت تبادل کاتیونی در کاربری‌های مختلف است.

واژه‌های کلیدی: تغییرپذیری مکانی، نیم‌تغییرنما، عناصر غذایی، مدل زمین‌آمار

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۲. گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۳. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، شیراز، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: owliaie@gmail.com

مقدمه

استفاده پایدار از منابع طبیعی و ایجاد تعادل بین میزان تولید محصول و بهبود کیفیت منابع طبیعی در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. خاک جزء بسیار مهم پایداری زیست‌بوم‌ها است که برای نیل به توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع طبیعی، مطالعه آن الزامی است. اما پیچیدگی‌های موجود در خاک اطلاعات ما را درباره چگونگی کارکردهای آن محدود کرده است (۲۴). برای حفظ حاصل‌خیزی و افزایش بهره‌وری خاک در کشاورزی پایدار، آگاهی از تأثیر کاربری اراضی بر ویژگی‌های مختلف خاک ضروری است. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیار زیادی به‌منظور یافتن روش‌های مناسب برای مطالعه مؤثر ویژگی‌های خاک به‌منظور صرفه‌جویی در زمان، هزینه‌های نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی انجام شده که این امر نه تنها به پژوهشگران علوم خاک؛ بلکه می‌تواند به سایر پژوهشگران در زمینه مطالعات محیطی و منابع طبیعی کمک کند (۲۱). استفاده یکسان از کودها و مواد اصلاح‌کننده بدون در نظر گرفتن تفاوت‌های مکانی ویژگی‌های خاک، می‌تواند علاوه بر افزایش هزینه و آلودگی محیط‌زیست به دلیل استفاده بیش‌ازحد از این ترکیبات، موجب کاهش عملکرد محصول شود. نیاز زیاد کشاورزان در یکی دو دهه اخیر برای دستیابی به داده‌های دقیق، از ویژگی‌های مکانی خاک به‌منظور سامان‌دهی مدیریتی و محیط‌زیستی، تأییدی بر این ادعاست (۴۴). در این ارتباط، روش‌های پیشرفته از جمله آمار مکانی همچون تکنیک زمین‌آمار، کمک‌کننده بوده‌اند (۱۴). تغییر کاربری اراضی جنگلی و مرتعی به زراعی، یکی از عوامل مهم تخریب زیست‌بوم و عاملی برای تغییر اقلیم جهانی تبدیل شده است. برآوردها نشان می‌دهد که سالانه حدود ۴۳۰ میلیون هکتار از اراضی مرتعی و جنگلی دنیا به اراضی زراعی تبدیل می‌شوند که بیش از ۳۰ درصد کل زمین‌های شخم‌خورده دنیا است (۵۰).

در یکی دو دهه اخیر استفاده از روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک، افزایش یافته است. این روش‌ها به‌عنوان رویکردهای نوآورانه و مؤثر به‌منظور بیان توزیع مکانی

ویژگی‌های خاک شناخته شده‌اند و تا حدودی توانسته‌اند مشکلات روش‌های سنتی را برطرف کنند (۳۹). تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی به‌طور مؤثری قادرند الگوی خاک‌ها را بر مبنای شاخص‌های محیطی مؤثر بر آن‌ها با دقت و تفکیک مکانی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی نشان دهند (۲۹). همچنین محصولات حاصل از نقشه‌برداری رقومی را می‌توان به‌راحتی بروز کرده و عدم قطعیت آن‌ها را به‌صورت کمی بیان کرد (۲).

زمین‌آمار، مجموعه‌ای از ابزارهای آماری را با اختلاط ابعاد زمانی و مکانی مشاهدات در پردازش داده‌ها فراهم می‌کند. زمین‌آمار تا دهه ۱۹۸۰، فقط ابزاری برای تشریح الگوی مکانی با استفاده از تحلیل ساختار مکانی (واریوگرافی) و همچنین پیش‌بینی مقدار یک ویژگی با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی بود. اما ابزارهای جدیدی که به‌تازگی توسعه پیدا کرده، مسائل جدی‌تر و دقیق‌تری همچون ارزیابی عدم قطعیت در مورد کیفیت ویژگی مد نظر و همچنین مدل‌سازی فرایندهای مکانی و زمانی را نیز حل می‌کند (۵۱). یکی از ابزارهای مطالعات زمین‌آمار، تابعی آماری به نام واریوگرام با تغییرنا است که امکان تجزیه و تحلیل ساختار مقیاس و شدت تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای را فراهم می‌کند. چنانچه واریوگرام به‌درستی تعیین شود، از آن نه تنها برای تخمین آماری، بلکه می‌توان به‌منظور طراحی و اصلاح شبکه نمونه‌برداری نیز استفاده کرد. توسعه گونه‌های مختلف روش‌های درون‌یابی، از جمله کریجینگ (شامل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، کریجینگ گسسته و...) باعث انعطاف‌پذیری و دامنه وسیع کاربردی زمین‌آمار در تجزیه و تحلیل بسیاری از مسائل موجود در علوم محیطی شده است. در زمین‌آمار وابستگی مکانی متغیرهای اندازه‌گیری شده به‌وسیله واریوگرام (تغییرنا) محاسبه می‌شود. یک تغییرنمای ایده‌آل دارای سه پارامتر اثر قطعه‌ای، حد آستانه و دامنه تأثیر است (۱۳).

استفاده از مدل‌های زمین‌آمار روشی آسان، سریع، ارزان و قابل اعتماد برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک است.

میان‌یابی مقادیر متغیرهای مختلف در فضای نمونه‌برداری با

عناصر پتاسیم و منگنز، تخمین‌گر وزن‌دهی معکوس فاصله و برای بقیه عناصر، تخمین‌گر کریجینگ قابلیت بهتری داشته است. کلاس همبستگی مکانی الگوی تغییرات عناصر آهن، مس و نیتروژن قوی و برای عناصر روی و فسفر متوسط بود (۳).

نتایج پژوهش زمین‌آماری انجام‌شده در استان گلستان در ارتباط با پهنه‌بندی عناصر پرنیاز نشان داد که روش کریجینگ، بهترین روش برای تخمین نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده بوده است. نیتروژن و پتاسیم با مدل نمایی و فسفر با مدل کروی بهترین برازش را بر اساس تحلیل نیم تغییرناهما داشتند (۲۵). پهنه‌بندی غلظت عناصر ریزمغذی در برخی اراضی زراعی شهرستان مراغه نشان داد که توزیع مقادیر عناصر ریزمغذی مورد بررسی تصادفی نبوده؛ بلکه مقادیر عناصر از نظر مکانی با هم ارتباط دارند. مقادیر عنصر روی دارای ساختار فضایی قوی ولی عناصر منگنز، آهن و مس دارای ساختار مکانی متوسط بودند. مدل‌های کروی و نمایی، مناسب‌ترین مدل‌های تئوری برای برازش تغییرنمای تجربی عناصر تشخیص داده شدند. همچنین عناصر مس و روی به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین دامنه تأثیر بوده و بین دامنه تأثیر عناصر و ضریب تغییرات آن‌ها رابطه خاصی دیده نشد (۳۳). از زمین‌آمار برای مرزبندی محدوده‌هایی با مدیریت مشابه نیز استفاده شده است. از جمله زراعت پیشه و همکاران (۵۴) در مطالعه زمین‌آماری پیرامون مرزبندی مناطق مدیریتی یکسان در جنوب شرق استان فارس، از مجموع حدود ۲۰ داده مطالعه‌شده خاک، پنج ویژگی کربن آلی، چگالی ظاهری، کربنات کلسیم معادل، آهن و سیلت را به‌عنوان داده‌های حداقلی برای جداسازی واحدهای مدیریتی همگن و خالص معرفی کردند.

پژوهش انجام‌شده پیرامون روندیابی تغییرپذیری مکانی کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف یک حوزه نیمه‌خشک در غرب ایران نشان داد که روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ با متغیر کمکی درصد آهک و روش تابع پایه شعاع‌محور با تابع اسپلین، به‌ترتیب دارای بیشترین کارایی در درون‌یابی بودند. مدل مناسب برای کلیه روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری در کلیه

استفاده از داده‌های مربوط به نقاط مشاهده‌ای و بر پایه راهکارهای مختلف تخمین به‌منظور پیوسته‌سازی الگوی تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای انجام می‌شود و درنهایت، با پهنه‌بندی مقادیر برآوردشده متغیرهای مختلف، نقشه‌های پیوسته تغییرات مکانی تهیه می‌شوند (۴۰).

در یکی دو دهه اخیر، مطالعات زیادی در ایران و جهان پیرامون استفاده از روش‌های زمین‌آماری به‌منظور پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک انجام شده است. از جمله پژوهش اخیر انجام‌شده در شرق چین، ترکیب مناسبی از دو عامل تراکم نمونه‌برداری و نوع مدل، برای پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک مهم تشخیص داده شد و پیشنهاد شد که توجه بیشتری به ساختار مکانی متغیرهای اصلی و رابطه آن‌ها با متغیرهای کمکی محیطی شود (۳۹). بوگونویچ و همکاران (۱۰) در مطالعه‌ای پیرامون تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک همچون pH، ماده آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس با استفاده از روش‌های تک‌متغیره و چندمتغیره در مزارع زراعی در شرق کرواسی به این نتیجه رسیدند که متغیرهای کمکی دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهند. همچنین توزیع ناهمگون فسفر و پتاسیم در منطقه مورد مطالعه ضرورت کوددهی را در برخی مناطق بارز می‌نماید.

در بررسی تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های شیمیایی و هیدرولیکی اراضی شهرستان ماهنشان، پیوستگی مکانی متوسط و زیاد همه پارامترهای هیدرولیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه گزارش شد. پارامتر نسبت جذب سطحی سدیم و قابلیت هدایت الکتریکی نسبت به سایر پارامترها از ساختار مکانی قوی‌تری برخوردار بودند. نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و فاصله وزنی معکوس با آماره‌های خطاسنجی، بیانگر برتری روش کریجینگ در برآورد پارامترهای هیدرولیکی و روش کوکریجینگ در برآورد پارامترهای شیمیایی خاک بوده است (۴۸). در مطالعه‌ای، اثر تغییر کاربری بر تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های تغذیه‌ای خاک در جنوب شهرستان بویراحمد بررسی شد. مدل کروی نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری داشته است. برای درون‌یابی مقادیر

منطقه شامل مخروط افکنه‌های آبرفتی و اریزه‌ای، فلات‌های مرتفع یا تراس‌های فوقانی و دشت‌های آبرفتی رودخانه‌ای هستند. رودخانه قره‌آغاج از بخش میانی دشت عبور کرده و منطقه مطالعاتی را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم کرده است. دشت دارای شیب ملایم از شمال غرب به جنوب شرق، با شیب متوسط حدود ۰/۴ درصد است. کاربری عمده اراضی در منطقه زراعت، باغ میوه و پوشش غالب طبیعی اراضی آن مرتع است. کشت عمده در منطقه، شامل گندم، جو، ذرت و صیفی‌جات هستند.

میزان بارندگی سالیانه منطقه حدود ۳۴۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالیانه هوا ۱۷/۱ درجه سلسیوس است. آب‌وهوای منطقه از نوع آب‌وهوای مدیترانه‌ای نیمه‌خشک معتدل طبقه‌بندی می‌شود. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به ترتیب زیرک و ترمیک هستند (۶). خاک‌های این منطقه بر اساس مطالعات زارعیان و حسن‌شاهی (۵۳) در چهار رده آنتی‌سول، اینسپتی‌سول، ورتی‌سول و آلفی‌سول طبقه‌بندی شدند (۴۵).

نمونه‌برداری

پس از طراحی شبکه آماربرداری سیستماتیک با ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در نرم‌افزار ArcGIS و انتقال مختصات محل برداشت نمونه‌ها به دستگاه سامانه موقعیت‌یاب جهانی، موقعیت محل نمونه‌برداری‌های خاک در منطقه شناسایی شد و نمونه‌های خاک سطحی (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. نیتروژن کل به روش کجلدال (۱۱)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم (۳۷)، فسفر قابل جذب به وسیله عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (۳۴)، عناصر ریزمغذی با استفاده از روش عصاره‌گیری با DTPA و توسط جذب اتمی تعیین شد (۲۸). مقادیر یون‌های کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع خاک به روش شعله‌سنجی تعیین شد (۴۶). در مجموع ۱۳۴ نمونه خاک شامل (۴۴) نمونه با کاربری مرتعی و ۹۰ نمونه با کاربری کشاورزی (زراعی - باغی) از منطقه برداشت شد (شکل ۱). شکل ۲ کاربری‌های منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

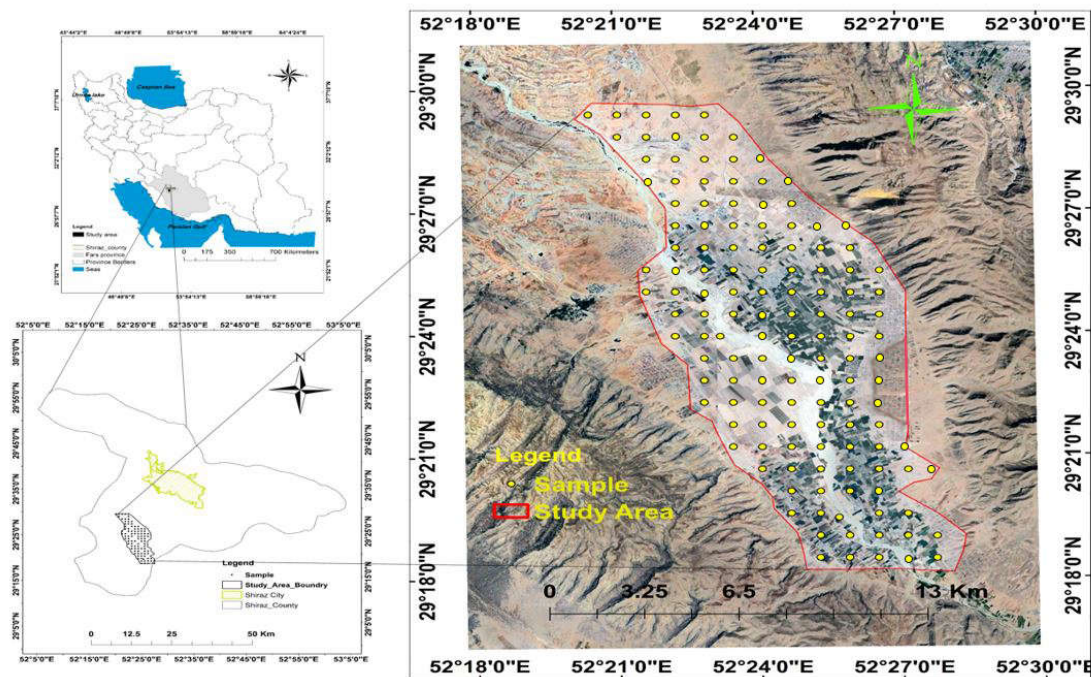
کاربری‌ها، مدل نمایی با گام حدود ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ متر و خطای اندازه‌گیری متوسط (۳۵ تا ۶۵ درصد) بود (۳۸).

دشت دارنگان واقع در جنوب غرب شیراز، منطقه‌ای با استعداد زیاد در کاربری‌های مختلف است. مطالعات زمین‌آماری و پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک انجام شده در مناطق مختلف، نتایج متفاوتی را گزارش کرده‌اند که لزوماً قابلیت تعمیم نتایج آن‌ها را به سایر مناطق ندارد. از این رو نیاز است که الگوی پراکنش مکانی متغیرهای خاک بررسی و روش‌های مختلف زمین‌آماری با هم مقایسه شود تا بهترین روش برای هر متغیر در آن منطقه به دست آید؛ بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های حاصل‌خیزی خاک منطقه و تهیه نقشه‌های توزیع مکانی با استفاده از مناسب‌ترین مدل‌های پیشنهادی و همچنین مقایسه خصوصیات خاک در کاربری‌های مختلف انجام شد. نتیجه حاصل از این پژوهش توانایی ارائه پیشنهاداتی به منظور مدیریت بهتر اراضی این منطقه را خواهد داشت. همچنین با مقایسه آماری بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های تأیید شده، می‌توان برای پیشنهاد مناسب‌ترین ابعاد شبکه نمونه‌برداری خاک به منظور افزایش دقت و کاهش هزینه در منطقه مورد مطالعه اقدام کرد.

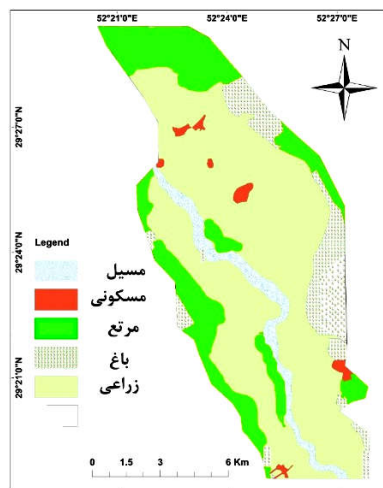
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با وسعتی حدود ۲۰ هزار هکتار در ۴۰ کیلومتری جنوب غرب شهر شیراز و در مرکز استان فارس قرار دارد. دشت دارنگان در محدوده "۵۰' ۵۲° تا "۱۲' ۲۸' ۵۲° طول شرقی و "۱۰' ۱۸' ۲۹° تا "۱۴' ۲۹' ۲۹° عرض شمالی قرار گرفته است. ارتفاع منطقه مورد مطالعه بین ۱۶۷۸ تا ۱۸۸۶ متر از سطح دریا تغییر می‌کند. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه دارای سازندهای آسماری (سنگ آهک و آهک دولومیتی)، جهرم (سنگ آهک فسیل‌دار و مارل)، آغاچاری (ماسه‌سنگ، کنگلومرا و مارن شنی)، سازند رازک (ماسه‌سنگ و مارن، گچ)، بختیاری (کنگلومرا) و رسوبات آبرفتی (لای و رس) دوران چهارم است (۱۹). واحدهای فیزیوگرافی این



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در استان فارس و نقاط نمونه‌برداری شده



شکل ۲. نقشه کاربری منطقه مطالعاتی دارنگان

تحلیل داده‌ها

به‌دست‌آمده با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم مقایسه شدند. محاسبه و رسم واریوگرام‌ها برای مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک، اعمال مدل‌های زمین‌آماري و رسم نقشه‌های پهنه‌بندی این مشخصه‌ها و به‌طورکلی مطالعات زمین‌آماري برای دستیابی به مناسب‌ترین مدل میان‌یابی از نظر دقت و صحت در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۷ انجام شد. همبستگی بین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۶ انجام شد.

به‌منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آمار توصیفی ویژگی‌های خاک، توزیع فراوانی با کمک ویژگی‌های آن شامل میانگین، میانه، کمینه، بیشینه، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۱ بررسی شد. برای بررسی آزمون نرمال‌بودن داده‌ها، از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف استفاده شد. همچنین میانگین نتایج

مطالعات زمین‌آماری

گفته می‌شود. به مقدار نیم‌تغییرنما به‌ازای $h=0$ اثر قطعه‌ای گفته می‌شود (۴۷). معمولاً اثر قطعه‌ای ناشی از خطاهای نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و تجزیه داده‌هاست. مقادیر متغیر در نقاط فاقد آمار در کلیه روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری از جمله کریجینگ با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (۱۲):

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

در این معادله $Z^*(x_0)$: مقدار تخمین‌زده‌شده متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات x_0 ، $Z(x_i)$: مقدار مشاهده‌شده متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات x_i ، λ_i : وزن یا اهمیت نسبت داده‌شده به متغیر Z نقطه‌ای به مختصات x_i و n : تعداد نقاط همسایگی است.

روش‌های متفاوتی برای برآورد متغیرهای وابسته به مکان وجود دارد که اختلاف عمده آن‌ها در محاسبه وزن‌هایی است که به نقاط مشاهده‌شده متغیر واقع در همسایگی نقطه مورد تخمین می‌دهد. درباره کیفیت برآورد تخمین‌گرها قضاوت می‌شود. درنهایت با محاسبه چهار آماره شامل ضریب تبیین، میانه انحراف قدرمطلق ((Mean Absolute Deviation (MAD))، درصد خطای مطلق میانگین ((Mean Absolute Percentage Error (MAPE)) و میانگین مجذور خطای نرمال‌شده ((Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)) به‌منظور تعیین صحت مدل و مقایسه نتایج حاصل از تخمین‌گرهای مختلف و انتخاب بهترین مدل با استفاده از روابط زیر اقدام شد (۲۰).

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]}{n} \quad (3)$$

$$MAPE = \left[\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) / n \right] * 100 \quad (4)$$

$$NRMSE = (RMSE \times 100) / Z_{avg} \quad (5)$$

در این روابط: $Z^*(x_i)$ مقدار برآوردشده، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر، Z_{avg} میانگین مقادیر مشاهده‌شده و n تعداد نقاط است. اگر تخمین کاملاً دقیق باشد، این شاخص‌ها باید به صفر برسند؛ بنابراین مقدار کمتر آن‌ها (به جز ضریب تبیین) نشان‌دهنده دقت بیشتر روش میان‌یابی است (۱۹). با توجه به اینکه مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر

نمونه‌های انتخاب‌شده در زمین‌آمار مستقل از جامعه نبوده؛ بلکه تا فاصله مشخصی به‌صورت مکانی نسبت به هم وابستگی دارند. این ارتباط مکانی ممکن است به شکل یک مدل ریاضی قابل بیان باشد که به این مدل‌ها، مدل‌های ریاضی ساختار مکانی می‌گویند و متغیرهایی که با این‌گونه مدل‌ها بیان می‌شوند، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شوند (۱۹). در واریوگرافی برای تشریح و مدل‌سازی رفتار واریوگرام از سه مؤلفه دامنه تأثیر، حد آستانه (سقف) و اثر قطعه‌ای استفاده می‌شود که بیانگر واریانس ساختاردار و واریانس بدون ساختار هستند. نسبت واریانس ساختاردار به حد آستانه، ساختار مکانی واریوگرام را نشان می‌دهد. ساختار ۷۵ درصد و بیشتر نشان‌دهنده ساختار قوی، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد بیانگر ساختار متوسط و کمتر از ۲۵ درصد نشان‌دهنده ساختار مکانی ضعیف متغیر مورد بررسی است (۱۲). رایج‌ترین واریوگرام‌های دارای سقف، واریوگرام‌های برازش‌شده با مدل‌های کروی و نمایی هستند. مهم‌ترین کاربرد واریوگرام، استفاده از اطلاعات آن در مدل‌های زمین‌آمار است؛ اما قبل از کاربرد آن در برآورد، لازم است تا مناسب‌ترین مدل تئوری شامل مدل‌های کروی، گوسی، نمایی و غیره بر آن برازش داده شود.

باتوجه به اینکه محاسبه نیم‌تغییرنما برای همه جامعه مورد مطالعه امکان‌پذیر نیست، نیم‌تغییرنما در یک فاصله تفکیکی مشخص به‌وسیله تابع زیر تخمین زده می‌شود (معادله ۱):

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

که در آن:

γ نیم‌تغییرنما، $N(h)$ شمار جفت نمونه‌های به‌کاررفته در محاسبات به‌ازای هر فاصله و به‌منظور تفکیک dh متغیر مشاهده شده و $Z(x+h)$ متغیر مشاهده‌شده به فاصله h از $Z(x)$ است. به فاصله بین نمونه‌ها که از آن به بعد مقادیر متغیر در نقاط مجاور تأثیری بر یکدیگر ندارند و با افزایش بیشتر فاصله مقدار نیم‌تغییرنما تفاوت معنی‌داری نمی‌کند، دامنه یا شعاع تأثیر

مکان‌های اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود (۲۰). در این بررسی از روش‌های زمین‌آماری شامل کریجینگ، کوکریجینگ و کریجینگ تجربی بی‌زین (Empirical Bayesian kriging) استفاده شد (۴۹). به این مدل‌ها، مدل‌های ساختار مکانی نیز گفته می‌شود و متغیرهایی که با این گونه مدل‌ها بیان می‌شوند، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شوند (۱۹). از طرفی، برای هر سه روش زمین‌آماری اشاره شده در بالا، از سه نوع برآورد معمولی، ساده و جهانی استفاده شد. این در حالی است که هر کدام از این سه نوع برآورد دارای ۱۱ نوع مدل هستند (۲۳).

نتایج و بحث

جدول ۱ توصیف آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. ضریب کولموگروف - اسمیرنوف در دامنه ۰/۰۵۶ برای فسفر تا ۰/۱۵۷ برای ویژگی پتاسیم متغیر بوده است. اگر مقدار این ضریب بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، آنگاه داده‌ها نرمال هستند و در صورتی که از ۰/۰۵ کوچک‌تر باشد، توزیع داده‌ها نرمال نیست. با توجه به نتایج به دست آمده کلیه ویژگی‌ها دارای مقدار ۰/۰۵ و یا بیشتر بوده که نشان‌دهنده نرمال بودن داده‌ها است.

مقادیر میانگین نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم در دسترس در منطقه مطالعاتی به ترتیب ۰/۰۸ درصد، ۱۳/۸ و ۳۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بوده است. همچنین مقادیر میانگین آهن، منگنز، روی و مس به ترتیب ۸/۸۶، ۱۹/۱، ۰/۹۹ و ۱/۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بوده است. میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۱/۹ سانتی‌مول (بار) بر کیلوگرم بوده است.

در بین متغیرهای مورد مطالعه، ظرفیت تبادل کاتیونی دارای کمترین ضریب تغییرات (۱۹/۹ درصد) و مقدار کلسیم و منیزیم دارای بیشترین ضریب تغییرات (۷۹/۵ و ۷۶/۲ درصد) بوده است (جدول ۱). خزایی و همکاران (۲۷) در مطالعه پیرامون تغییرات مکان و ویژگی‌های خاک منطقه قزوین اظهار کردند که مقدار pH کمترین و مقادیر فسفر و پتاسیم، بیشترین ضریب تغییرات در بین متغیرهای مطالعه شده را داشته‌اند.

است، مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده برای دو متغیر با واحدهای متفاوت درست نخواهد بود؛ بنابراین مقدار RMSE را به متوسط داده‌های متغیر وابسته تقسیم کرده و آن را RMSE نرمال شده (NRMSE) می‌نامند. این معیار برای مقایسه مدل‌های مختلف مناسب خواهد بود. گفتنی است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است (۴۱). در این مطالعه با انتخاب مناسب‌ترین مدل با بیشترین صحت برای آن متغیر، از آماره NRMSE (میانگین مجذور خطای نرمال شده) برای مقایسه صحت مناسب‌ترین مدل‌های برگزیده شده بین متغیرهای مختلف استفاده شد (جدول ۳). در نهایت با استفاده از اطلاعات حاصل از محاسبات تغییرنما و انتخاب مناسب‌ترین روش میان‌یابی با بیشترین دقت، اقدام به پهنه‌بندی متغیرهای مختلف شد و نقشه‌های پراکنش مکانی خصوصیات خاک در ابعاد مشخصی تعیین و از نقاط تخمینی برای مقایسه بهره‌گیری شد.

مطالعات میان‌یابی

پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک در منطقه مورد مطالعه با دو روش میان‌یابی قطعی (Deterministic) و زمین‌آماری انجام شد. در روش‌های قطعی یا معین، تنها از توابع ریاضی استفاده شده و مستقل از ارتباط مکانی بین مقادیر متغیرها هستند. در این بررسی از روش‌های قطعی شامل چندجمله‌ای جهانی (Global Polynomial Interpolation; GPI)، میان‌یابی چندجمله‌ای محلی (Local Polynomial Interpolation; LPI)، وزن‌دهی فاصله معکوس (Inverse Distance Weight; IDW)، و تابع پایه شعاعی (Radial Basis Function; RBF) استفاده شد (۲۰).

در روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری از توابع ریاضی و آمار استفاده شده و فرض بر این است که نمونه‌های انتخاب شده از جامعه مستقل نبوده؛ بلکه تا فاصله معینی به صورت مکانی نسبت به هم وابستگی دارند. در روش‌های زمین‌آماری از مدل واریوگرام برای توصیف پیوستگی مکانی داده‌های ورودی و تخمین مقدار

جدول ۱. توصیف آماری ویژگی‌های حاصل‌خیزی خاک در منطقه مطالعاتی

متغیر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیدگی	ضریب کولموگروف اسمیرنوف
N	%	۰/۰۰۴	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۰۳	۳۷/۵	۱/۹۰	۶/۷۲	۰/۱۱۲
CEC	cmlkg ⁻¹	۶/۱۸	۱۷/۷	۱۱/۹	۲/۳۷	۱۹/۹	۰/۰۲	-۰/۸۱	۰/۰۷۵
P	mgkg ⁻¹	۲	۶۰	۱۳/۸	۸/۲۱	۵۹/۴	۲/۰۱	۵/۰۴	۰/۰۵۶
K	mgkg ⁻¹	۱۴۰	۶۲۸	۳۲۶/۴	۹۶/۶	۲۹/۶	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۱۵۷
Fe	mgkg ⁻¹	۲/۲۶	۴۷/۸	۸/۸۶	۶/۴۶	۷۲/۹	۳/۳۳	۱۵/۳	۰/۰۸۴
Mn	mgkg ⁻¹	۳/۵۲	۴۴/۲	۱۹/۱	۸/۲۶	۴۳/۲	۰/۱۶	۰/۴۳	۰/۱۰۳
Zn	mgkg ⁻¹	۰/۲۸	۳/۴۴	۰/۹۹	۰/۶۲	۶۲/۶	۱/۷۶	۳/۶۴	۰/۰۷۶
Cu	mgkg ⁻¹	۰/۶۴	۳/۷۲	۱/۷۲	۰/۵۲	۳۰/۲	۰/۸۷	۱/۹۴	۰/۰۹۴
Ca	mel ⁻¹	۲/۰	۳۸/۰	۱۲/۵	۹/۹۴	۷۹/۵	۱/۰۵	-۰/۱۷	۰/۰۶۱
Mg	mel ⁻¹	۱/۸	۳۷/۲	۹/۱۲	۶/۹۵	۷۶/۲	۱/۳۹	۲/۰۶	۰/۰۶۸

دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد با بیشتر ویژگی‌ها بوده‌اند. متغیرهایی که دارای سطوح همبستگی زیادی هستند، بهترین انتخاب برای کمک به برآورد بهتر ویژگی‌های مورد مطالعه توسط روش‌های مختلف زمین‌آماري هستند.

در پژوهش انجام‌شده در خاک‌های استان اصفهان، پیرامون توزیع مکانی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌غیر از pH که با هیچ‌کدام از ویژگی‌های دیگر خاک همبستگی نداشته است، بقیه ویژگی‌های خاک دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد بوده‌اند (۳۱). اطلاعات جدول ۲ برای انتخاب دو مشخصه، یکی با بیشترین همبستگی معنی‌دار و دیگری با کمترین همبستگی، به‌عنوان متغیر کمکی در تحلیل‌های کوکریجینگ استفاده شد. باین‌حال در مورد سایر مشخصه‌ها به روش تجربی با اضافه کردن متغیر سوم یا حتی متغیرهایی با غیر از کمترین و بیشترین همبستگی، نتیجه بهتری در مورد کاهش میانگین مجذور خطا یا سایر آماره‌های تخمین‌گر استفاده‌شده به‌دست آمد (جدول ۳).

جدول ۳ پارامترهای واریوگرام و شاخص خطای تخمین برای ویژگی‌های مطالعه‌شده خاک را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، با

کیوانی و همکاران (۲۶) نیز در منطقه شهرکرد به ترتیب کمترین و بیشترین ضریب تغییرات را برای pH و آهن گزارش کردند. ضریب تغییرات کم در ویژگی‌های خاک ناشی از اثر عوامل ذاتی مانند مواد مادری در رفتار آن متغیر است؛ درحالی‌که ضریب تغییرات زیاد می‌تواند ناشی از اثر ترکیبی عوامل مدیریتی (مانند مصرف کود و نوع کاربری اراضی) و عوامل ذاتی (مانند پستی و بلندی، تغییرات شدید بافتی و وضعیت زهکشی) در منطقه مورد مطالعه باشد. تفکیک ویژگی‌های خاک بر پایه عواملی که منجر به پراکندگی و فاصله‌ی بیشتر داده‌ها از میانگین می‌شوند، از جمله شکل اراضی یا نوع مواد مادری موجب کاهش ضریب تغییرات، چولگی و نرمال‌شدن توزیع فراوانی داده‌ها می‌شود.

در مطالعه زمین‌آماري انجام‌شده در شرق رود کارون در استان خوزستان توسط شهین‌زاده و همکاران (۴۳) ویژگی‌های شن (۵۶٪)، قابلیت هدایت الکتریکی (۴۹٪) و پتاسیم (۴۰٪) بیشترین و اسیدیته (۴٪) کمترین ضریب تغییرات را داشته‌اند.

به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در منطقه مورد مطالعه، میزان ضریب همبستگی بین زوج پارامترها محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. از بین این ویژگی‌ها، نیتروژن کل و فسفر

جدول ۲. ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مطالعه‌شده خاک

نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	آهن	منگنز	روی	مس	ظرفیت تبادل کاتیونی
۱	۰/۵۵۰**	۰/۴۴۵**	۰/۳۲۷**	۰/۲۹۷**	۰/۴۱۰**	۰/۳۱۲**	۰/۳۶۴**	۰/۲۹۶**	۰/۲۵۱**
فسفر	۱	۰/۲۸۳**	۰/۱۲۹	۰/۱۹۸	۰/۱۹۱*	۰/۲۰۳*	۰/۳۰۷**	۰/۲۳۶*	۰/۰۵۴
پتاسیم		۱	۰/۲۳۹*	۰/۲۰۶*	۰/۰۸۰	۰/۱۰۲	۰/۲۵۷**	۰/۳۳۴**	۰/۲۵۶**
کلسیم			۱	۰/۷۸۳**	۰/۱۷۸	۰/۰۰۲	۰/۱۷۳	۰/۱۹۳	۰/۳۱۱**
منیزیم				۱	۰/۰۹۷	۰/۰۵۷	۰/۱۸۱	۰/۱۳۲	۰/۲۱۲*
آهن					۱	۰/۲۶۶**	۰/۰۸۴	۰/۷۰۹**	۰/۱۸۳
منگنز						۱	-۰/۲۰۸*	۰/۲۱۸*	۰/۱۷۲
روی							۱	۰/۱۴۴	۰/۱۳۳
مس								۱	۰/۳۱۱*
ظرفیت تبادل کاتیونی									۱

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد آماری.

جدول ۳. پارامترهای واریوگرام و شاخص خطای تخمین برای ویژگی‌های مطالعه‌شده خاک

متغیر	مدل متغیر	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنه (متر)	(%)	اثر قطعه‌ای به آستانه	کلاس مکانی	نرمال‌شده (%)	میانگین مجذور خطای	میان انحراف قدرمطلق	درصد خطای مطلق	ضریب تبیین
نیتروژن	CoKriging- Simple- Tetraspherical	۰/۳۰۰۷	۰/۷۲۶	۲۵۸۴	۴۱/۴۱	متوسط	۰/۱۷۹	۳/۲۵	۱۰/۷۸	۰/۵۶		
فسفر	CoKriging- simple-Exponential	۰/۴۹۴۲	۰/۴۹۰	۳۲۸۶	۱۰۰/۸	قوی	۵/۵۱۴	۰/۵۶	۵۶/۳۴	۰/۷۶		
پتاسیم	CoKriging- J-Bessel	۳۹۵۷/۷	۵۳۳۰/۵	۲۰۱۶	۷۴/۱۴	متوسط	۴۶/۲۲	۰/۱۷۸	-۶/۹۳۴	۰/۵۳		
کلسیم	CoKriging- simple- Stable	۰/۱۰۵۹	۱۰۵/۹	۲۰۶۵	۰/۱	قوی	۰/۶۶۴	۰/۰۶۷	۵/۱۸۲	۰/۹۴		
منیزیم	CoKriging- simple- Pentaspherical	۰/۱۷۱۴	۰/۸۰۷	۴۶۳۸	۲۱/۲۳	قوی	۰/۶۳۱	۰/۰۷۸	۱۳/۲۸	۰/۹۷		
آهن	CoKriging- J-Bessel	۰	۱/۰۵۶	۲۰۰۰	۰	قوی	۲/۰۱۸	۰/۳۷۴	۲۷/۱۱	۰/۸۹		
منگنز	CoKriging- simple-Stable	۰/۳۵۱۷	۰/۵۸۵	۲۲۳۷	۶۰/۱۱	متوسط	۵/۴۸۰	۰/۳۴۳	۴۳/۷۴	۰/۸۱		
روی	Simple Kriging- Gaussian	۰/۷۲۵۸	۰/۴۶۹	۱۳۰۳۷	۱۵۴/۷۵	ضعیف	۰/۳۶۸	۰/۵۰۴	۴۵/۰۹	۰/۶۰		
مس	CoKriging- simple- Rational Quadratic	۰/۰۰۱۱	۱/۱۲۵	۲۰۴۸	۰/۰۹۷	قوی	۰/۲۲۴	۰/۱۶۸	۱۴/۸۴	۰/۶۴		
CEC	CoKriging- Ordinary- spherical	۰	۷/۹۴۶	۲۰۰۴	۰	قوی	۰/۱۰۵	۰/۰۱۰	۱۲/۵۶	۰/۹۹		

ظرفیت تبادل کاتیونی مدل کروی ساده بوده‌اند. برای متغیر روی روش کریجینگ ساده و برای سایر متغیرها روش کوکریجینگ استفاده شد. ساختار مکانی برای نیتروژن، پتاسیم و منگنز متوسط و برای روی ضعیف و برای سایر متغیرها قوی به دست آمد.

در نظر گرفتن آماره‌های استفاده‌شده، بهترین مدل ساختار مکانی با بیشترین دقت، برای نیتروژن چهاروجهی کروی، فسفر، نمایی ساده، پتاسیم و آهن، J-Bessel، کلسیم و منگنز، مدل stable، منیزیم پنج‌وجهی کروی، روی مدل گوسی، مس مدل منطقی درجه دوم و

شعاعی، به دلیل دارا بودن ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی بیشتر و میانگین مجذور خطای کمتر، روش‌های مناسبی در تهیه نقشه پهنه‌بندی این دو ویژگی بوده‌اند. تغییرپذیری مکانی عناصر غذایی اراضی شالیزاری در شرق هند با استفاده از زمین‌آمار مطالعه شد. نتایج نشان داد که مدل نمایی برای کربن آلی و منگنز، مدل گوسی برای نیتروژن و فسفر، مدل کروی برای پتاسیم و مدل دایره‌ای برای آهن و روی بهترین تناسب را داشته‌اند. توزیع مکانی این عناصر در خاک به مواد مادری، مدیریت خاک و نوع کاربری زمین نسبت داده شده است (۱۸).

دانش و همکاران (۱۶) تغییرپذیری مکانی کربن آلی خاک را با روش‌های شبکه عصبی و درونیابی تخمین زدند. بهترین برازش بر اساس ریشه میانگین مربع خطا و میانگین خطا انتخاب شدند. بهترین مدل‌های نیم‌تغییرنماهای برازش داده‌شده کروی بودند. روش اعتبارسنجی متقابل، شبکه عصبی مصنوعی را به‌عنوان دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی کربن آلی خاک نشان داد. کمترین اثر قطعه‌ای مربوط به مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی، آهن و مس (با مقدار صفر) و بیشترین اثر قطعه‌ای مربوط به مقادیر فسفر و مس بود (جدول ۳). مقادیر کم یا صفر اثر قطعه‌ای، بیانگر پیوستگی مکانی بین نقاط هم‌جوار و کوچک‌تر از فواصل نمونه‌برداری، خطاهای اندازه‌گیری و آزمایشگاهی و دیگر تغییرات غیرقابل پیش‌بینی است (۸). همچنین زیاد بودن اثر قطعه‌ای در واقع معیاری از نامناسب بودن فواصل نمونه‌گیری است؛ چرا که اثر قطعه‌ای نشان‌دهنده تغییرات مکانی است که در فاصله‌های کمتر از فواصل نمونه‌گیری وجود دارد (۵۱).

وابستگی مکانی قوی ممکن است ناشی از تغییرات ذاتی خاک و وابستگی مکانی ضعیف‌تر به دلیل تغییرات غیرذاتی خاک (مدیریتی) کنترل شود. به همین دلیل می‌توان اظهار کرد که تفاوت در تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاه مرتبط با عوامل خاک‌سازی و مدیریت اراضی در هر منطقه است (۵۵). همبستگی مکانی همچنین، به میزان زیادی به مقیاس مطالعه بستگی دارد. برای نمونه ویژگی‌هایی که وابستگی مکانی متوسطی دارند، این امکان را دارند که در

ضریب تبیین بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در دامنه ۰/۵۶ (برای نیتروژن کل) تا ۰/۹۹ (برای ظرفیت تبادل کاتیونی) به‌دست آمده است. کمترین میانگین مجذور خطای نرمال‌شده به ترتیب برای ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۰۱)، کلسیم (۰/۰۶) و منیزیم (۰/۰۷) و بیشترین این آماره به ترتیب برای نیتروژن (۳/۲۵)، فسفر (۰/۰۵۶) و روی (۰/۵۰۴) محاسبه شد (جدول ۳). ضریب تبیین به نسبت زیادی ($r^2=0/55$) بین این دو شاخص خطا به‌دست آمد. همان‌گونه که پیش‌ازین گفته شد که مقادیر NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق‌بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد مناسب‌بودن مدل، ۳۰ درصد نشانه ضعیف‌بودن مدل است. براین اساس تمامی ویژگی‌های مطالعه‌شده دارای مدل دقیقی بوده‌اند.

ویژگی‌های خاک موجود در نقشه جهانی خاک در پژوهشی با استفاده از نقشه‌برداری رقومی بررسی شد و از بین ویژگی‌های خاک، بیشترین دقت پیش‌بینی مربوط به اسیدیته ($r^2=0/6$) و سپس ویژگی‌های رس، سیلت، شن، کربن آلی و چگالی ظاهری بودند. ویژگی‌های مقادیر قطعات درشت و عمق خاک، کمترین درجه پیش‌بینی را داشته‌اند ($r^2=0/28$) (۱۵). تغییرپذیری مکانی و تحلیل زمین آماری ویژگی‌های خاک در مناطق زراعی بنگلادش مطالعه شد و از بین ویژگی‌های بررسی‌شده، مقادیر نیتروژن و اسیدیته خاک بیشترین دقت و فسفر و پتاسیم کمترین میزان دقت پیش‌بینی را داشته‌اند. ویژگی‌های اسیدیته، هدایت الکتریکی، کربن آلی و پتاسیم وابستگی مکانی قوی را نشان دادند؛ درحالی‌که ویژگی‌های نیتروژن، گوگرد و فسفر وابستگی مکانی متوسطی داشتند (۵۶).

ژینگ‌ی و همکاران (۵۲) اظهار کردند که روش کریجینگ توانایی درونیابی متغیرها با دقت زیاد را در مطالعه‌ای مرتبط با تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک با استفاده از زمین‌آمار داشته است. شعبانی و همکاران (۴۲) تغییرات اسیدیته و مقدار املاح محلول آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان در استان فارس را به روش زمین‌آمار مطالعه و اظهار کردند که روش کریجینگ ساده و معمولی نسبت به روش‌های وزنی عکس فاصله و تابع پایه

مقیاس‌های کوچک‌تر از مقیاس به‌کاررفته، وابستگی مکانی قوی‌تری نشان دهند (۱۷).

ویژگی‌های آهن، ظرفیت تبادل کاتیونی و پتاسیم در بین ویژگی‌های مورد مطالعه دارای کمترین دامنه تأثیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ متر) و روی و منیزیم بیشترین دامنه تأثیر (به ترتیب ۱۳۰۳۷ و ۴۶۳۸ متر) را داشته است (جدول ۳). دامنه تأثیر ویژگی‌های خاک، وابسته به مقیاس مورد مطالعه و فاصله نقاط نمونه‌برداری دارد. بیشتر بودن دامنه تأثیر، نشان‌دهنده تغییر و ناهمگونی کمتر آن ویژگی در منطقه مطالعاتی است (۱۷). دامنه تأثیر بزرگ‌تر دلالت بر پیوستگی مکانی دارد و این امکان را می‌دهد که نقاط مجهول را در نقاط دورتر نیز با دقت برآورد کرد. براین اساس دامنه تأثیر زیاد آهن، قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم، نشان‌دهنده پایداری این ویژگی در خاک‌های مورد مطالعه است. در مقابل روی و منیزیم، بیشترین میزان تغییرات در سطح منطقه را نشان داده‌اند. به‌طور کلی دامنه تأثیر، فاصله‌ای است که در مقادیر بیشتر از آن، نمونه‌ها بر هم تأثیری نداشته و یا وابستگی کافی نشان نمی‌دهند و در واقع مستقل از یکدیگر هستند. چنین فاصله‌ای حد همبستگی ویژگی‌های مد نظر را مشخص ساخته و اطلاعاتی در رابطه با حد مجاز فاصله نمونه‌برداری را ارائه می‌کند. در پژوهشی به‌منظور بررسی تغییرات مکانی برخی از ویژگی‌های خاک در شرق شیراز، وابستگی هر یک از متغیرها نسبت به مکان بررسی شد. از بین متغیرها، اسیدیت کمترین وابستگی مکانی با دامنه ۱۹/۱ متر و قابلیت هدایت الکتریکی بیشترین وابستگی مکانی را با دامنه ۱۳۴ متر در منطقه مورد مطالعه نشان دادند (۹). در مطالعه زمین‌آماری انجام‌شده در استان خوزستان دامنه تأثیر ویژگی‌های اسیدیت و شن (۶۱۱ متر)، قابلیت هدایت الکتریکی (۲۵۶ متر)، سیلت (۲۵۴ متر)، پتاسیم (۲۵۳ متر)، رس (۲۵۲ متر) و کربنات کلسیم معادل (۳۲ متر) به‌دست آمد. همچنین روش پایه شعاعی برای تخمین مقادیر ویژگی‌های آهن، شن، قابلیت هدایت الکتریکی، سیلت و کربنات کلسیم معادل و روش کریجینگ معمولی برای تخمین مقادیر اسیدیت، پتاسیم و رس دقت بیشتری داشته‌اند (۴۳).

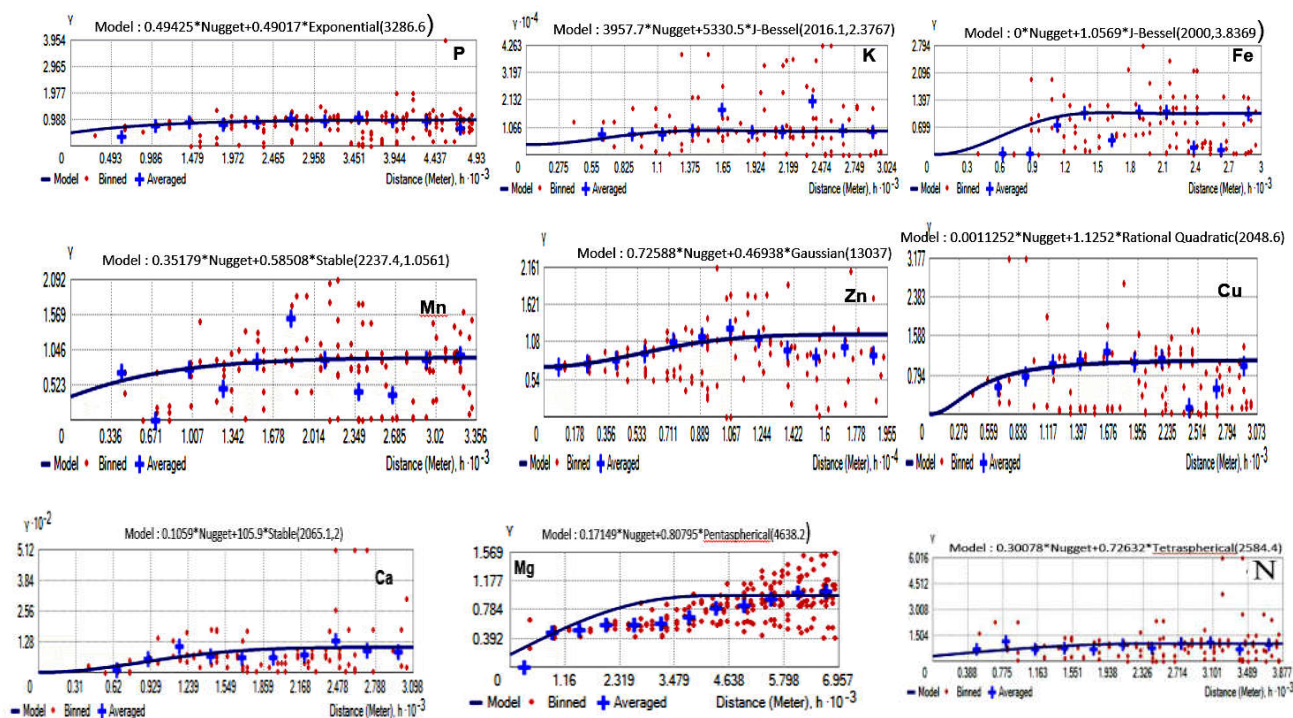
در مطالعه زمین‌آماری برخی ویژگی‌های خاک در اراضی

جنگلی تحت فرسایش در استان کهگیلویه و بویراحمد، کلاس همبستگی مکانی قوی برای ویژگی‌های مورد مطالعه گزارش و آن را گواهی بر الگوی پیوسته تغییرات مکانی آن ویژگی‌ها و کارایی فاصله نمونه‌برداری در انعکاس تغییرات مکانی متغیرهای مورد بررسی گزارش کردند (۳۲). توزیع مکانی ویژگی‌های خاک در منطقه‌ای در استان گلستان ایران بررسی شد. از میان ویژگی‌های مطالعه‌شده، پتاسیم (۹۴ متر) بیشترین نیرتات کمترین (۲۴ متر) دامنه وابستگی مکانی را داشت. ویژگی‌های اسیدیت، قابلیت هدایت الکتریکی، فسفر، کربنات کلسیم، شن، سیلت، رس و ماده آلی دارای دامنه وابستگی مکانی متوسط بودند (۴).

تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک منطقه‌ای در شمال غرب هندوستان با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی و کلاسیک بررسی شد. توزیع مکانی ویژگی‌های خاک با کریجینگ معمولی بر اساس مقادیر میانگین مربعات خطا برای منیزیم با مدل گوسی‌ریال، برای قابلیت هدایت الکتریکی و کربن آلی با مدل نمایی و برای ویژگی‌های اسیدیت، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم با مدل کروی ترسیم شد. میزان وابستگی مکانی حاصل از تحلیل نیم‌تغییرنماها، نشان‌دهنده وابستگی متوسط (۷۴/۲ درصد) تا قوی (۱۷/۶ درصد) ویژگی‌های مطالعه شده بود (۷).

پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک با استفاده از زمین‌آمار در اراضی جنوب غرب شیراز نشان داد که بهترین مدل برای بررسی قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، اسیدیت و چگالی ظاهری مدل نمایی، و برای مقادیر رس، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی مدل کروی بوده است (۳۶).

شکل ۳ نیم‌تغییرنماهای برازش‌شده برای مناسب‌ترین مدل‌های یادشده در جدول ۳ برای پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری‌شده خاک در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. آنچه از نتایج این بررسی برمی‌آید، حکایت از برتری مدل‌های زمین‌آماری بر مدل‌های قطعی آزمون‌شده در این بررسی در مورد ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده خاک دارد. گفتنی است تغییر ابعاد شبکه آماری بر دقت مدل و انتخاب آن نقش مؤثری دارد؛



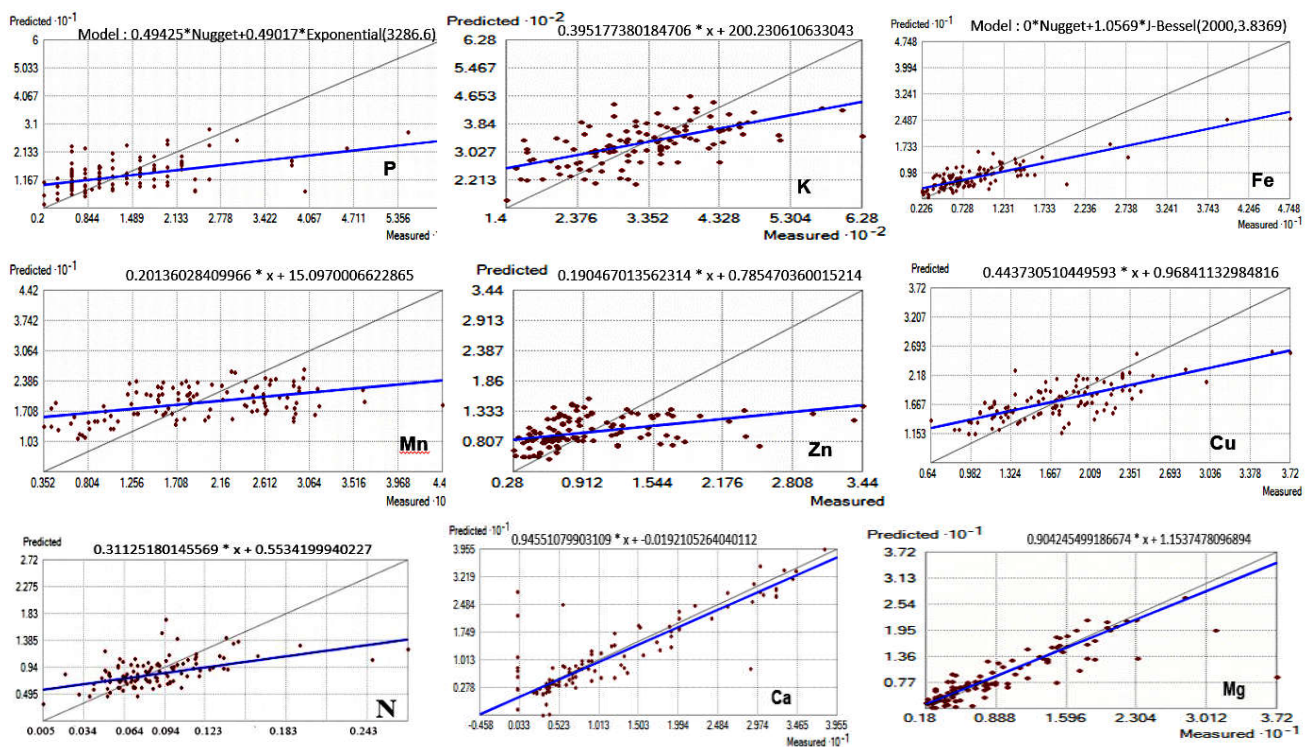
شکل ۳. نیم تغییرنماهای ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

قوی هستند، درحالی که در آن‌ها پراکنش نقاط حول نمودار برازش شده نامتقارن‌تر و پراکنده‌تر است؛ بنابراین می‌توان به تأثیر منفی اثر قطعه‌ای بر ساختار مکانی مدل‌ها اشاره کرد. همین مقایسه در ارتباط با نمودار برازش شده مدل دقت و صحت به روش ارزیابی متقابل (شکل ۴)، نشان‌دهنده عدم انطباق خط متوسط پیش‌بینی بر خط متوسط برازش شده مقادیر اندازه‌گیری شده در نمودارهای گروه‌های ضعیف و متوسط است. در ارتباط با مشخصه‌های با ساختار مکانی ضعیف و متوسط، پیشنهاد این است که در رابطه با آن‌ها مدل‌های دیگر پهنه‌بندی غیر از مدل‌های زمین‌آمار و آمار قطعی آزمون‌شده در این مطالعه بررسی شود.

دامنه تأثیر را می‌توان به‌عنوان حد قابل قبول برای ابعاد شبکه آماربرداری در نظر گرفت؛ چرا که با توجه به شکل ۳، در این فاصله تغییرات نیم‌تغییرنما ثابت شده و با افزایش بیشتر فاصله تغییر در اختلاف داده‌ها ایجاد نمی‌شود (۱). به عبارت دیگر هر چه فاصله نمونه‌برداری‌ها از دامنه تأثیر کمتر باشد، شباهت داده‌ها به هم بیشتر است. این موضوع می‌تواند

بنابراین، نتایج این بررسی فقط برای شبکه آماربرداری ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه اعتبار دارد. انتخاب اندازه شبکه نمونه‌برداری برای مطالعات زمین‌آمار و مدیریتی به عوامل متعددی از جمله دقت پروژه، مسائل اقتصادی، یکنواختی زمین، شاخص‌های مورد اندازه‌گیری و ... بستگی دارد. در این مطالعه که بستر آن نقشه یک میلیونیم ویژگی‌های خاک استان بوده است، شبکه نمونه‌برداری با ابعاد یادشده طراحی و اجرا شد که بسته به نوع منطقه مطالعاتی، نوع تغییرپذیری ویژگی مد نظر و اثرات مدیریتی اراضی بر آن ویژگی فاصله نمونه‌برداری می‌تواند متفاوت باشد.

مقایسه بین نمودار نیم‌تغییرنماها، نمودار برازش مدل ارزیابی دقت (میانگین مجذور خطای نرمال‌شده) برای مشخصه‌هایی که دارای ساختار مکانی ضعیف (عنصر روی) و متوسط (نیترژن، پتاسیم و منگنز) هستند، با آن‌هایی که دارای ساختار مکانی قوی هستند، نشان می‌دهد که نمودار نیم‌تغییرنماها (شکل ۳) مربوط به متغیرهای با ساختار مکانی ضعیف و متوسط به‌طور کلی دارای اثر قطعه‌ای بزرگ‌تری نسبت به نمودار نیم‌تغییرنمای مربوط به گروه



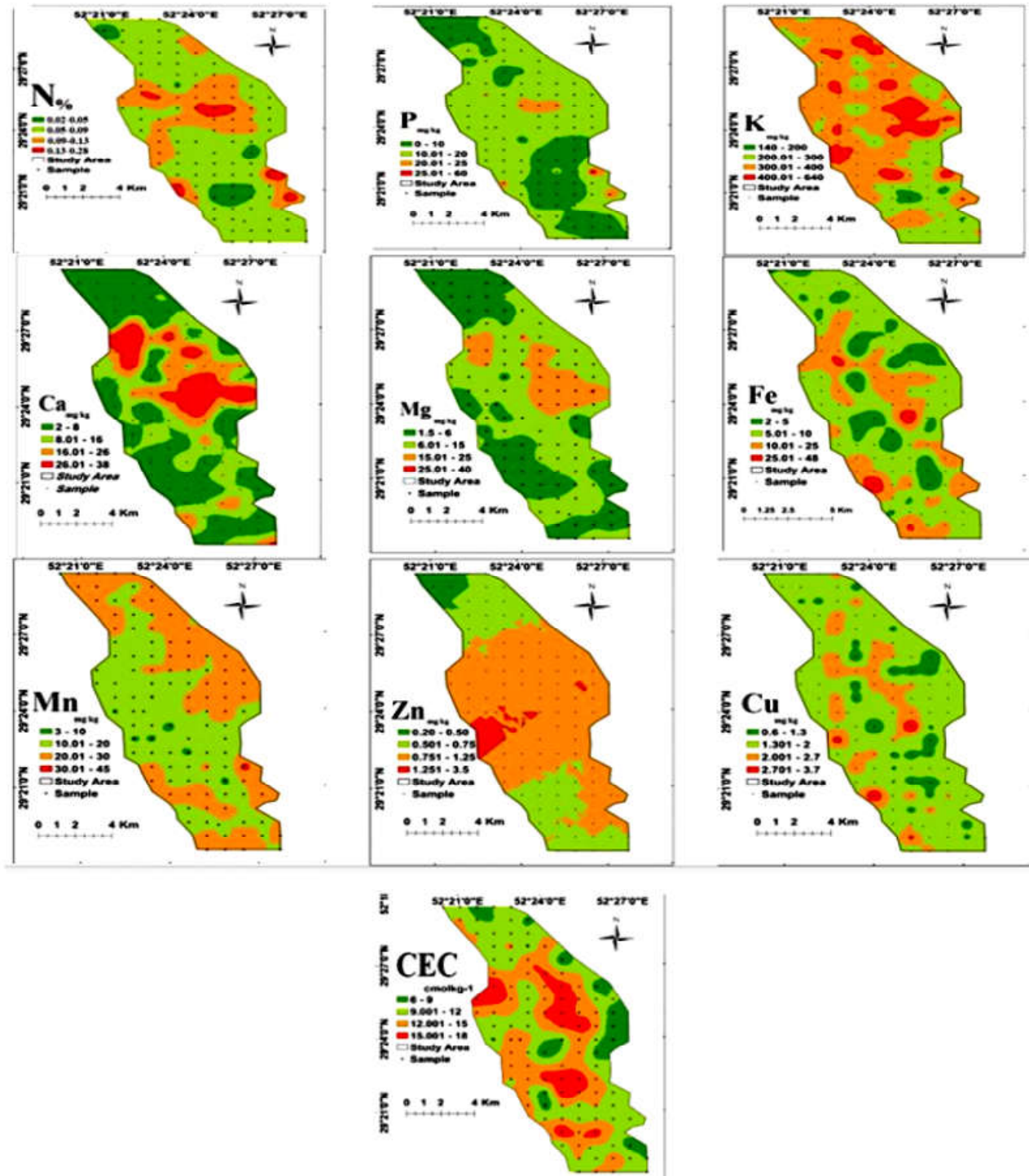
شکل ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ویژگی‌های خاک

در نتیجه نتایج جهت‌دهی می‌شوند. امروزه با توجه به کاربرد عمومی هوش مصنوعی و با استفاده از انواع ملزومات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، لازم است محیط‌های نرم‌افزاری برای استفاده در این زمینه کاری توسعه داده شود؛ به طوری که دقیق‌ترین و مناسب‌ترین مدل‌ها از آزمون و مقایسه گزینه‌های مختلف پیش‌فرض حاصل آید که بدون شک نتیجه با آنچه در این مطالعه به صورت تحلیل انفرادی برای هر کدام از مشخصه‌های خاک به دست آمد، متفاوت‌تر و دقیق‌تر خواهد بود.

شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی ویژگی‌های مورد مطالعه بر اساس بهترین روش درون‌یابی آن‌ها را نشان می‌دهد. جنس مواد مادری، شرایط پستی و بلندی، مقدار ماده آلی، وضعیت زهکشی خاک و نوع کاربری از جمله عوامل اثرگذار بر پهنه‌بندی ویژگی‌های مورد مطالعه است.

جدول ۴ مساحت و درصد سطوح چهارگانه ویژگی‌های مطالعه شده بر اساس نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۵ حد بحرانی پیشنهاد شده برای غلظت

راهنمایی برای تنظیم شبکه آماربرداری برای نمونه‌برداری مشخصه‌های مد نظر خاک در منطقه بر اساس هدف از پیش تعیین شده باشد. بر اساس نتایج جدول ۳ برای بسیاری از مشخصه‌ها می‌توان ابعاد شبکه را در محدوده ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر در نظر گرفت که این موضوع می‌تواند در کاهش هزینه‌های آماربرداری و زمان کمتر مؤثر باشد. در این مطالعه با آزمون مدل‌های زمین‌آماری و قطعی برای هر یک از مشخصه‌های اشاره شده خاک در نرم‌افزار، مناسب‌ترین مدل با بیشترین دقت و صحت و کمترین میزان میانگین مجذور خطا بر نیم‌تغییرنمای طراحی شده روی داده‌های آن مشخصه برآزش شد. از طرفی در هر سری تحلیل داده برای هر یک از مشخصه‌های مد نظر، چنانکه در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، بسیاری از پیش‌فرض‌های نرم‌افزار برای انجام تحلیل‌ها استفاده شد. این موضوع برای نرم‌افزارهای مشابه در دسترس نیز صادق است که باعث بیشتر شدن احتمال خطای کاربر در انتخاب دقیق‌ترین مدل‌ها شده و از طرفی به دلیل انتخاب پیش‌فرض‌های نرم‌افزار، راه انتخاب گزینه‌ها محدود شده و



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی حاصل از مناسب‌ترین مدل انتخاب‌شده برای ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده خاک

۲۸ درصد با کمبود فسفر و حدود ۲۴ درصد با کمبود پتاسیم مواجه هستند. در ارتباط با عناصر ریزمغذی نیز حدود ۷۸ درصد اراضی مورد مطالعه با کمبود آهن، ۶۳ درصد با کمبود روی و مساحت

عناصر غذایی در خاک‌های زراعی و باغی ایران را نشان می‌دهد (۳۰). بر اساس داده‌های این جدول‌ها بیش از ۹۶ درصد از اراضی مورد مطالعه دارای کمبود نیتروژن، حدود

جدول ۴. مساحت و درصد سطوح چهارگانه ویژگی‌های مطالعه‌شده بر اساس نقشه پهنه‌بندی شکل ۵

	سطح ۱		سطح ۲		سطح ۳		سطح ۴	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
نیترژن	۸۴۰	۴/۲	۱۴۴۸۰	۷۲/۴	۳۹۲۰	۱۹/۶	۷۶۰	۳/۸
فسفر	۵۶۴۰	۲۸/۲	۱۳۹۴۰	۶۹/۷	۳۶۰	۱/۸	۶۰	۰/۳
پتاسیم	۵۲۰	۲/۶	۴۳۶۰	۲۱/۸	۱۳۵۴۰	۶۷/۲	۱۵۸۰	۷/۹
کلسیم	۱۲۱۰۰	۶۰/۵	۵۲۸۰	۲۶/۴	۱۳۴۰	۶/۷	۱۲۸۰	۶/۴
منیزیم	۵۹۶۰	۲۹/۸	۱۲۴۶۰	۶۲/۳	۱۵۲۰	۷/۶	۶۰	۰/۳
آهن	۱۵۰۰	۷/۵	۱۴۲۲۰	۷۱/۱	۳۷۶۰	۱۸/۸	۵۲۰	۲/۸
منگنز	۳۶۰	۱/۸	۱۱۸۲۰	۵۹/۱	۷۶۶۰	۳۸/۳	۱۶۰	۰/۸
روی	۱۰۶۰	۵/۳	۵۲۸۰	۲۶/۴	۱۲۴۸۰	۶۲/۴	۱۱۸۰	۵/۹
مس	۸۶۰	۳/۴	۱۶۱۶۰	۸۰/۸	۲۳۶۰	۱۱/۸	۶۲۰	۳/۱
CEC	۱۶۶۰	۸/۳	۸۸۲۰	۴۴/۱	۷۷۴۰	۳۸/۷	۱۷۸۰	۸/۹

جدول ۵. حد بحرانی پیشنهادشده برای غلظت عناصر غذایی در خاک‌های زراعی و باغی ایران

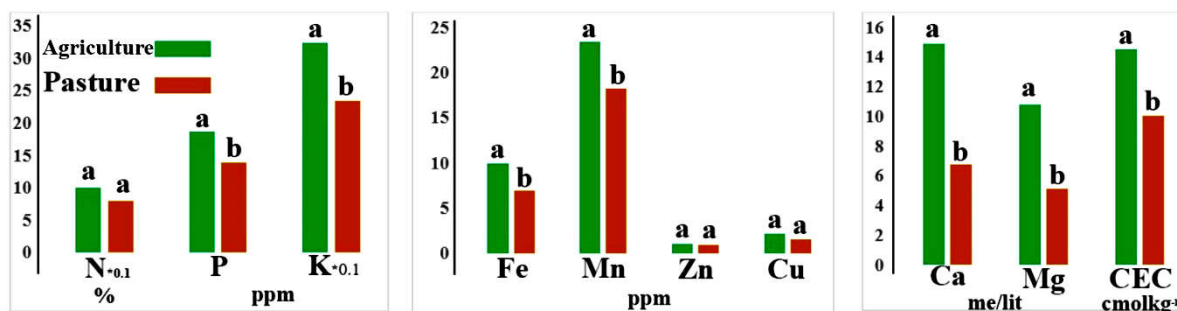
مس	روی	منگنز	آهن	پتاسیم	فسفر	نیترژن کل	کربن آلی
							%
							mgkg ⁻¹
۱	۱	۸	۱۰	۳۰۰	۱۰	۰/۱۶	۲

اراضی مواجه با کمبود مس و منگنز کمتر از ۵ درصد بوده است. براین اساس در صورتی که مدیریت تغذیه‌ای اراضی مورد مطالعه بر مبنای پهنه‌بندی صورت گرفته انجام شود، از مصرف بیش از حد کودها که موجب آلودگی محیط زیست و افزایش هزینه جلوگیری به عمل خواهد آمد.

نتایج مقایسه آماری ویژگی‌های مطالعه‌شده در کاربری‌های کشاورزی (زراعی - باغی) و مرتعی نشان می‌دهد که مقادیر فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، کلسیم، منیزیم و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد هستند (شکل ۶). بیشترین اختلاف به ترتیب مربوط به مقادیر کلسیم، منیزیم، ظرفیت تبادل کاتیونی و پتاسیم بوده است. پژوهش‌های زیادی در ارتباط اثر نوع کاربری بر تغییر ویژگی‌های خاک انجام شده است. بیشترین و کمترین مقادیر کربن آلی به ترتیب در کاربری جنگل

متراکم و اراضی تخریب‌شده و بیشترین و کمترین مقادیر رس در کاربری‌های جنگل متراکم و اراضی زراعی منطقه یاسوج گزارش شدند (۳۵). در پژوهشی دیگر در مناطق جنگلی زاگرس، تغییر کاربری اراضی از جنگل به اراضی زراعی کم بازده، موجب کاهش معنی‌دار مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، نیترژن، فسفر، پتاسیم و عناصر ریزمغذی شده است (۳). تغییر کاربری از زراعت به جنگل طی حدود ۲۰ سال در جنوب چین منجر به افزایش مواد آلی (۲۱٪)، نیترژن کل (۱۸٪)، نیترژن قابل دسترس (۶۵٪)، فسفر قابل دسترس (۱۷٪) و پتاسیم قابل دسترس (۱۷٪) شد (۱۴).

باقرزاده و همکاران (۵) با استفاده از زمین‌آمار، پهنه‌بندی سه عنصر ازت، فسفر و پتاسیم را در ۲۵۰۰ هکتار از اراضی گندم‌کاری استان خراسان انجام دادند. نتایج نشان داد که باتوجه‌به



شکل ۶. تأثیر کاربری اراضی کشاورزی (زراعی - باغی) و مرتعی بر ویژگی‌های مطالعه‌شده (حروف متفاوت برای هر مشخصه، اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد را نشان می‌دهد)

مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در دامنه ۰/۵۶ (برای نیتروژن) تا ۰/۹۹ (برای ظرفیت تبادل کاتیونی) به‌دست آمده است. کمترین میانگین مجذور خطای نرمال‌شده برای ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۰۱) و بیشترین این آماره برای نیتروژن (۳/۲۵) محاسبه شد. کمترین اثر قطعه‌ای مربوط به مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی، آهن و مس (با مقدار صفر) و بیشترین اثر قطعه‌ای مربوط به مقادیر فسفر و مس بود. همچنین ویژگی‌های آهن، ظرفیت تبادل کاتیونی و پتاسیم در بین ویژگی‌های مورد مطالعه دارای کمترین دامنه تأثیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ متر) و روی و منیزیم بیشترین دامنه تأثیر (به ترتیب ۱۳۰۳۷ و ۴۶۳۸ متر) را داشته است.

مقایسه بین نمودار نیم‌تغییرنماها، نمودار برازش مدل ارزیابی دقت برای مشخصه‌هایی که دارای ساختار مکانی ضعیف (روی) و متوسط (نیتروژن، پتاسیم و منگنز) هستند، با آن‌هایی که دارای ساختار مکانی قوی هستند، نشان می‌دهد که نمودار نیم‌تغییرنماهای مربوط به متغیرهای با ساختار مکانی ضعیف و متوسط، دارای اثر قطعه‌ای بزرگ‌تری نسبت به نمودار نیم‌تغییرنمای مربوط به گروه قوی هستند؛ درحالی که در آن‌ها پراکنش نقاط، حول نمودار برازش‌شده نامتقارن‌تر و پراکنده‌تر است. مطالعه نیم‌تغییرنماهای برازش‌شده برای مناسب‌ترین مدل‌های انتخاب‌شده برای پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری‌شده خاک در منطقه، بیانگر برتری مدل‌های زمین‌آماری بر مدل‌های قطعی آزمون‌شده در مورد ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده خاک دارد.

نیاز تغذیه‌ای گندم در کل محدوده مورد مطالعه، در مجموع ۱۵۸۰۰۰ کیلوگرم انواع کود، بیش از نیاز به مصرف می‌رسد. با انجام این پژوهش‌ها می‌توان با تعیین مقدار نیاز واقعی کود مصرفی در مزرعه علاوه بر مصرف متعادل کودها، از آلودگی زیست محیطی، تخریب خاک و ضرر اقتصادی به دولت و کشاورزان جلوگیری کرد. جلالی و همکاران (۲۲) معتقدند که در اراضی کشاورزی تحت کشت، تأثیر فرایندهای مدیریتی مانند کوددهی، شخم زدن، آبیاری و غیره را باید در نظر داشت؛ چراکه این فرایندها به‌مرور می‌توانند همبستگی مکانی متغیرهای خاک را تحت تأثیر قرار دهند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در بین متغیرهای مورد مطالعه، ظرفیت تبادل کاتیونی دارای کمترین ضریب تغییرات و کلسیم و منیزیم دارای بیشترین ضریب تغییرات بوده‌اند. از بین ویژگی‌های مطالعه‌شده، نیتروژن کل و فسفر دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی‌دار با سایر ویژگی‌ها بوده‌اند. همچنین با در نظر گرفتن آماره‌های استفاده‌شده، بهترین مدل ساختار مکانی با بیشترین دقت برای فسفر، نمایی ساده، پتاسیم و آهن، J-Bessel، کلسیم و منگنز، مدل stable، نیتروژن و منیزیم، چندوجهی کروی و روی مدل گوسی و مس، مدل منطقی درجه دوم بوده‌اند. ساختار مکانی برای عنصر روی، ضعیف، برای نیتروژن، پتاسیم و منگنز متوسط و برای سایر متغیرها قوی به‌دست آمد. ضریب تبیین بین

منطقه و مناطق مشابه، فاصله مکان‌های نمونه‌برداری خاک بر اساس دامنه تأثیر مشخصه مد نظر انجام شود. باتوجه‌به نتایج، مشخص شد که مدل‌سازی بر مبنای زمین‌آمار به‌خوبی توانایی بیان عمده تغییرات پیوسته ویژگی‌های خاک را دارد. تغییرات کیفی و کمی خاک در ارتباط با نوع مواد مادری، پستی‌وبلندی و کاربری اراضی می‌توانند شاخص‌هایی بهینه برای طراحی شبکه‌های نمونه‌برداری و شناخت بخش‌های مختلف مدیریتی بر مبنای کشاورزی دقیق و همچنین به‌منظور کاهش مصرف سم و کود و حفظ محیط‌زیست باشد. استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، جنگل‌های تصادفی، یادگیری ماشین و غیره به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌ها در برآورد مقدار ویژگی‌های خاک توصیه می‌شوند.

بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی، ۹۶، ۲۸ و ۲۴ درصد از اراضی مورد مطالعه به‌ترتیب دارای کمبود نیتروژن، فسفر و پتاسیم مواجه هستند. در ارتباط با عناصر ریزمغذی نیز ۷۸ و ۶۳ درصد اراضی با کمبود آهن و روی و مساحت اراضی مواجه با کمبود مس و منگنز کمتر از ۵ درصد بوده است. نتایج مقایسه آماری ویژگی‌های مطالعه‌شده در کاربری‌ها (زراعی - باغی و مرتعی) نشان می‌دهد که مقادیر فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، کلسیم، منیزیم و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد هستند. بیشترین اختلاف به‌ترتیب مربوط به مقادیر کلسیم، منیزیم، ظرفیت تبادل کاتیونی و پتاسیم بوده است. نظر به تغییرپذیری مشخصات خاک و نیز تفاوت دامنه تأثیر این مشخصات، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی در این

منابع مورد استفاده

- Alizadeh, A., A. Sheykheslami, H. Kiadaliri, S., Khazaei, S. Poul, M. Salmanian, and M. Ramezani Poul. 2019. Achieving optimal dimensions for systematic sampling of forest using variography method in geostatistics (case study: series 5 of Safarood Ramsar forestry plan). *Forest Research and Development* 5(4): 645-656 (in Farsi).
- Arrouays, D., A. McBratney, J. Bouma, Z. Libohova, A.C. Richer-de-Forges, C.L. Morgan, and V.L. Mulder. 2020. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional* 20: e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
- Askari, S., H.R. Owliaie, Y. Safari and M. Sedghi. 2019. Spatial variability of some soil fertility characteristics as affected by land use change, Yasouj region. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 9(1): 65-81 (in Farsi).
- Ayoubi, Sh., S., Mohammad Zamani and F. Khormali. 2007. Spatial variability of some soil properties for site specific farming in northern Iran. *International Journal of Plant Production* 1(2): 225-236.
- Bagherzadeh, A. M. Abbaszadeh and E. Afshar. 2023. Evaluation of nutrient elements distribution in soil to optimize fertilizer's consumption by wheat cultivation. *Sustainable Agricultural Science Research* 2(4): 34-54 (in Farsi).
- Banaei, M. H. 1998. Soil Moisture and Temperature Regime Map of Iran. Soil and Water Research Institute, Ministry of Agriculture, Iran.
- Bangroo, S.A., J. Sofi, M. Bhat, Sh. Mir, T. Mubarak and O. Bashir. 2021. Quantifying spatial variability of soil properties in apple orchards of Kashmir, India, using geospatial techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2047): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08457-6>
- Behnam, V., A. Gholamalizadeh Ahangar, M. Rahmanian and A. Bameri. 2019. Spatial distribution of some physical and chemical properties of soil using geostatistic methods (Case study: Zabol to Zahedan route). *Journal of Environment and Water Engineering* 5(3): 251-263. (In Persian) DOI: 10.22034/jewe.2019.200821.1330.
- Bijanazadeh, E., M. Mokarram and R. Naderi. 2014. Applying spatial geostatistical analysis models for evaluating variability of soil properties in Eastern Shiraz, Iran. *Iran Agricultural Research* 33(2): 35-46.
- Bogunovic, I., L. Filipovic, V. Filipovic and P. Pereira. 2021. Spatial mapping of soil chemical properties using multivariate geostatistics. A study from cropland in eastern Croatia. *Journal of Central European Agriculture* 22(1): 201-210. doi.org/10.5513/JCEA01/22.1.3011
- Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual. United States Department of Agriculture. Scientific Publishers, Washington, USA.
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco and A.E. Konopka. 1994. Field-Scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Journal of Soil Science Society of America* 58 (3): 1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

13. Cao, C., S. Jiang, Z. Ying, F. Zhang and X. Han. 2011. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin sandy land of Northeast China. *Ecological Engineering*, 37(10): 1467-1475. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.012>
14. Chen, D.D., S. H. Zhang, S. K. Dong, X. T. Wang and G. Z. Du. 2010. Effect of land-use on soil nutrients and microbial biomass of an alpine region on the northeastern Tibetan plateau, china. *Land Degradation Development* 21(5): 446-452.
15. Chen, S., D. Arrouays, V. Leatitia Mulder, L. Poggio and et al. 2022. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma* 409: 116957. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115567>
16. Danesh, M., F. Taghipour, M. Emadi and M. Ghajar Sepanlou. 2022. The interpolation methods and neural network to estimate the spatial variability of soil organic matter affected by land use type. *Geocarto International* 37(26): 11306-11315. doi.org/10.1080/10106049.2022.2048905
17. Foroughifar, H., A.A. Jafarzadah, H. Torabi, H. Gelsefidi, N. Aliasgharzadah, N. Toomanian and N. Davatgar. 2011. Spatial variations of surface soil physical and chemical properties on different landforms of Tabriz Plain. *Water and Soil Science* 21(3): 1-21 (in Farsi).
18. Gangopadhyay, S.K. and G.P. Obi Reddy. 2022. Spatial variability of soil nutrients under the rice-fallow system of eastern India using geostatistics and Geographic Information System. *Journal of Soil and Water Conservation* 21(1): 55-66. DOI: 10.5958/2455-7145.2022.00007.8
19. Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, USA.
20. Gunarathna, M.H.J.P., K.G.S. Nirmanee and M.K.N. Kumari. 2016. Are geostatistical interpolation methods better than deterministic interpolation methods in mapping salinity of groundwater? *International Journal Research Innovation Earth Science* 3(3): 59-64.
21. Hartemink, A.E. 2008. Soils are back on the global agenda. *Soil Use and Management* 24(4): 327-330. [doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00187.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00187.x)
22. Jalali, Gh., M.M. Tehrani, N. Broomand. and S. Sanjari. 2013. Comparison of geostatistical methods for mapping the spatial distribution of some nutrients in the East of Mazandaran Province. *Soil Researches* 27(2): 195-204 in Farsi.
23. Johnson, K., J. M. Ver Hoef, K. Krivoruchko and N. Lucas. 2001. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI Press, Redlands, USA.
24. Karlen, D.L., S.S. Andrews, B.J. Wienhold and T.M. Zobeck. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. *Electronic Journal of Integrative Biosciences* 6(1): 3-14.
25. Kazemi Poshtmasari, H., Z. Tahmasebi, B. Kamkar, Sh. Shataei and S. Sadeghi. 2012. Evaluation of geostatistical methods for estimating and zoning of macronutrients in agricultural lands of Golestan Province. *Water and Soil Science* 22(1): 201-220 (in Farsi).
26. Keyvani, N., M.H. Salehi, J. Mohammadi and A.R. Mohammadkhani. 2017. The role of aspect on spatial variability of soil properties and quantitative, qualitative, and vegetative properties of peach in Saman Region, Shahrekord. *Journal of Water and Soil* 31(1): 202-215 (in Farsi).
27. Khazaie, E., A. Bostani and N. Davatgar. 2017. Geostatic and GIS evaluation of spatial variability of nitrogen, phosphorus, potassium, and cation exchange capacity in agro-industrial land of Sharif Abad in Qazvin. *Soil Research* 31(2): 195-213.
28. Lindsay, W.L., and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42(3): 421-428.
29. Liu, F., D.G. Rossiter, X. Song, G.L. Zhang, H. Wu and Y. Zhao. 2020. An approach for broad-scale predictive soil properties mapping in low-relief areas based on responses to solar radiation. *Soil Science Society of America Journal* 84(1): 144-162. <https://doi.org/10.1002/saj2.20025>
30. Malakouti, M.J., F. Moshiri, M.N. Gheibi and S. Molavi. 2005. *Optimum concentration of nutrients in soil and some agricultural and horticultural crops*. Agricultural Education Publication, Tehran, Iran (in Farsi).
31. Mashayekhi, P. and A.R. Marjovvi. 2023. Spatial distribution of some soil physico-chemical properties in agricultural soils of Isfahan province, *Iranian Journal of Soil and Water Research* 54(2): 389-405. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352609.669414>
32. Nasiri, E., H.R. Owliaie, Y. Safari and M. Sedghi Asl. 2019. Geostatistical assessing of some soil properties variability due to the oak land deforesting in Mokhtar plain, Yasouj. *Applied Soil Research* 7(3): 83-97 (in Farsi).
33. Nourzadeh Hadad, M. and A. Bybordi. 2014. The zonation of micronutrient concentrations for fertilization management in some agricultural lands of northwest of Iran using geostatistics. *Journal of Soil Management* 3: 11-19 (in Farsi).
34. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-430. In: A.L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, USA.

35. Owliaie, H. R., E. Adhami and M. Najafi Ghiri. 2023. Changes in soil magnetic properties and iron oxides following land use change (Case study: Mokhtar Plain, Kohgilouye Province). *Journal of Water and Soil* 36(2): 267-282 (in Farsi).
36. Owliaie, H.R., A.R. Salehi and Gh. Zareian. 2024. Geostatistical assessment of the spatial distribution of some Soil properties of the soils of Darengan region with different land uses, Fars province. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 55(1): 97-116 (in Farsi). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367197.669596>
37. Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney. 1982. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. In Soil Science Society of America, Wisconsin, USA.
38. Parvizi, Y., M. Gorji, M.H. Mahdian and M. Omid. 2012. Spatial variability delineation of soil organic carbon in different land use type of a semi-arid watershed. *Journal of Water and Soil* 26(1): 162-172 (in Farsi).
39. Qu, L., H. Lu, Z. Tian, J.M. School, B. Huang, Y. Liang, D. Qiu and Y. Liang. 2024. Spatial prediction of soil sand content at various sampling density based on geostatistical and machine learning algorithms in plain areas. *Catena* 234: 107572.
40. Santra, P., U.K. Chopra and D. Chakraborty. 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. <https://www.jstor.org/stable/24103193>
41. Savage, M.J. 1993. Statistical aspects of model validation. Presented at a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa.
42. Shabani, H., M.A. Delavar, Y. Safari and P. Alamdari. 2020. Spatial variability of some soil characteristics in lands of Zanjan University. *Applied Soil Research* 7(4): 164-178 (in Farsi).
43. Shahinzadeh, N., T. Babaeinejad, K. Mohsenifar and N. Ghanavati. 2022. Spatial variability of soil properties determined by the interpolation methods in the agricultural lands. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4): 4897-4907. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01402-w>
44. Sharma, R.P., T.D. Lama, R.B. Yadava, B. Singh, A.K. Pandey, A.B. Rai and S.N.S. Chaurasia. 2011. Nutrient management for commercial vegetable production in India. PP. 1-50. Technical Bulletin, Indian Institute of Vegetable Research, Varanasi.
45. Soil Survey Staff. 2022. Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources. Conservation Service. USA.
46. Swift, R. S. and D. L. Sparks. 1996. Methods of Soil Analysis: Chemical Methods, Part 3. ACSESS, Madison, USA.
47. Utset, A., T. Lopez and M. Diaz. 2000. A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially predicting bulk density and field capacity of Ferralsols in the Havana-Matanzas Plain. *Geoderma* 96(3): 199-213.
48. Vahedi, S., D.H. Zarebyaneh, M. Taheri and O. Bahmani. 2013. Spatial variability of specific hydraulic and chemical properties of Qezel-ouzan river farmland using geostatistical methods. *Iranian Water Research Journal* 7(1): 141-150 (in Farsi).
49. Wackernagel, H. 2003. Geostatistical models and kriging. *IFAC Proceedings Volumes* 36(16): 543-548.
50. Wali, M.K., F. Evrendilek and T. West. 1999. Assessing terrestrial ecosystem sustainability usefulness of regional carbon and nitrogen models. *Journal of Nature Resources* 35(4): 20-33.
51. Webster, R. and M.A. Oliver. 2007. Geostatistics for environmental scientists. Chichester: John Wiley and Sons, New York, USA.
52. Xing-Yi, Z., S. Yue-Yu', Z. M. Xu Dong, M. Kai and S.J. Herbert. 2007. Spatial Variability of Nutrient Properties in Black Soil of Northeast China. *Pedosphere* 17(1): 19-29.
53. Zareian, Gh. and M.H. Hasanshahi. 2004. Revision of semi-detailed studies of soil science and suitability of lands for major crops in Darengoon plain (Fars province). *Soil and Water Research Institute* 55(1): 97-116 (in Farsi).
54. Zeraatpisheh, M., E.L. Bottega, E. Bakhshandeh, H.R. Owliaie, R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry, T. Scholten and M. Xu. 2022. Spatial variability of soil quality within management zones: homogeneity and purity of delineated zones. *Catena* 209(1): 105835 [10.1016/j.catena.2021.105835](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105835)
55. Zhang, X., F. Lin, F. Y. Jiang, K. Wang and X.L. Feng. 2009. Variability of total and available copper concentrations in relation to land use and soil properties in Yangtze River Delta of China. *Environmental Monitoring and Assessment* 155(1): 205-213.
56. Zulfikar Khan, M.D., M.D. Rafikul Islam, A.B. Abdus Salam and T. Ray. 2021. Spatial Variability and geostatistical analysis of soil properties in the diversified cropping regions of Bangladesh using geographic information system techniques. *Applied and Environmental Soil Science* 1:6639180 | <https://doi.org/10.1155/2021/6639180>

Assessment of Geostatistical Approach to Spatial Distribution of Soil Fertility Characteristics of the Southwest of Shiraz in Different Land Uses

H. R. Owliaie^{*1}, A. R. Salehi² and G. R. Zareian³

(Received: June 25-2024 ; Accepted: August 29-2024)

Abstract

The spatial distribution of soil characteristics is a fundamental factor for planning sustainable agriculture. Geostatistical methods are widely used to determine the spatial variability of soil characteristics in unknown locations. This research was carried out to evaluate the geostatistical methods for zoning some characteristics of the Darnagan area including agricultural (crop and horticultural) and pasture land uses in the southwest of Shiraz. 134 surface soil samples were collected with a grid pattern from three different land uses, and some of their fertility characteristics were measured. The results based on precision criteria revealed that exponential co-kriging was the best method for interpolating P, J-Bessel for K and Fe, stable model for Ca and Mn, tetra spherical model for N and Mg, Gaussian model for Zn, and rational quadratic model for Cu. The weak spatial structure was obtained for Zn, medium for N, K, and Mn, and strong for other variables. According to spatial distribution maps, 96, 28, and 24% of the studied area are deficient in nutrients N, P, and K, respectively. Concerning micronutrient elements, 78% and 63% of the region are deficient in Fe and Zn, respectively. The statistical comparison of the studied characteristics indicated a significant difference in P, K, Fe, Mn, Ca, Mg, and CEC amounts in different land uses.

Keywords: Spatial variability, Semi-variogram, Nutrient elements, Geostatistical model

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasuj, Iran.

2. Department of Forestry, Range, and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Yasouj University, Yasuj, Iran.

3. Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.

*: Corresponding author, Email: owliaie@gmail.com