

## ارزیابی روش های زمین آماری به منظور پهنه بندی ویژگی های حاصلخیزی خاک اراضی جنوب غرب شیراز با کاربری های مختلف

حمیدرضا اولیایی<sup>۱\*</sup>، علیرضا صالحی<sup>۲</sup> و غلامرضا زارعیان<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج،

<sup>۲</sup> گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج،

<sup>۳</sup> بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس.

### چکیده

آگاهی از توزیع مکانی ویژگی های خاک به عنوان عامل اساسی برای برنامه ریزی کشاورزی پایدار در نظر گرفته می شود. روش های زمین آماری به طور گسترده ای به منظور تعیین تغییرپذیری مکانی ویژگی های خاک در نقاط ناشناخته استفاده می شود. این پژوهش به منظور ارزیابی روش های زمین آماری جهت پهنه بندی برخی ویژگی های حاصلخیزی منطقه دارنگان با کاربری های مختلف (زراعی-باغی و مرتعی) در جنوب غرب شیراز انجام پذیرفت. ۱۳۴ نمونه خاک سطحی با الگوی شبکه ای، از کاربری های مختلف برداشت و ویژگی های حاصلخیزی آنها اندازه گیری 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، روی مدل گوسی و مس، مدل منطقی درجه دوم بوده اند. ساختار مکانی برای روی، ضعیف، برای نیتروژن، پتاسیم و منگنز متوسط و برای سایر متغیرها قوی برآورد شد. بر اساس نقشه های پهنه بندی، ۹۶، ۲۸ و ۲۴ درصد از اراضی مورد مطالعه به ترتیب با کمبود نیتروژن، فسفر و پتاسیم مواجه هستند. در ارتباط با عناصر ریزمغذی نیز ۷۸ و ۶۳ درصد از اراضی به ترتیب دارای کمبود آهن و روی هستند. مقایسه آماری ویژگی های مطالعه شده بیانگر تفاوت معنی دار مقادیر فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، کلسیم، منیزیم و ظرفیت تبادل کاتیونی در کاربری های مختلف است.

**واژه های کلیدی:** تغییرپذیری مکانی، نیم تغییرنما، عناصر غذایی، مدل زمین آمار

### مقدمه

استفاده پایدار از منابع طبیعی و ایجاد تعادل بین میزان تولید محصول و بهبود کیفیت منابع طبیعی در سال های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. خاک جزء بسیار مهم پایداری زیست بوم ها است که برای نیل به توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع طبیعی، مطالعه آن الزامی است، اما پیچیدگی های موجود در خاک اطلاعات ما را در باره چگونگی کارکردهای آن محدود کرده است (۲۴). برای حفظ حاصلخیزی و افزایش بهره وری خاک در کشاورزی پایدار، آگاهی از تأثیر کاربری اراضی بر ویژگی های مختلف خاک ضروری است. در سال های اخیر تلاش های بسیار زیادی به منظور یافتن روش های مناسب برای مطالعه مؤثر ویژگی های خاک به منظور صرفه جویی در زمان، هزینه های نمونه برداری و تجزیه های آزمایشگاهی انجام گرفته که این امر نه تنها به پژوهشگران علوم خاک بلکه سایر محققان در زمینه مطالعات محیطی و منابع طبیعی می تواند کمک کند (۲۱). استفاده یکسان از کودها و مواد اصلاح کننده بدون در نظر گرفتن تفاوت های مکانی ویژگی های خاک، می تواند علاوه بر افزایش هزینه و

آلودگی محیط زیست به دلیل استفاده بیش از حد از این ترکیبات، موجب کاهش عملکرد محصول شود. نیاز بالای کشاورزان در یکی دو دهه اخیر جهت دستیابی به داده‌های دقیق، از ویژگی‌های مکانی خاک به منظور سامان‌دهی مدیریتی و محیط زیستی، تاییدی بر این ادعا است (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 شده‌است. 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 می‌باشد (۵۰).

در یکی دو دهه اخیر استفاده از روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک، افزایش یافته است. این روش‌ها به عنوان رویکردهای نوآورانه و مؤثر به منظور بیان توزیع مکانی ویژگی‌های خاک شناخته شده‌اند و تا حدودی توانسته‌اند مشکلات روش‌های سنتی را برطرف کنند (۳۹). تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی به طور 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 به راحتی به‌روز نموده و عدم قطعیت آن‌ها را به صورت کمی بیان نمود (۲).

زمین‌آمار، مجموعه‌ای از ابزارهای آماری را با اختلاط ابعاد زمانی و مکانی مشاهدات در پردازش داده‌ها فراهم می‌آورد. زمین‌آمار تا دهه ۱۹۸۰، صرفاً 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 اخیراً توسعه پیدا کرده، مسائل جدی‌تر و دقیق‌تری همچون ارزیابی عدم قطعیت در مورد کیفیت ویژگی مورد 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 می‌آورد. چنانچه واریوگرام به درستی تعیین شود، از آن نه تنها برای تخمین آماری، بلکه می‌توان به منظور 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 به وسیله 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 استفاده از داده‌های مربوط به نقاط مشاهده‌ای و بر پایه راهکارهای مختلف تخمین به منظور پیوسته‌سازی الگوی تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای انجام می‌شود و در نهایت، با پهنه‌بندی مقادیر برآورد شده متغیرهای مختلف، نقشه‌های پیوسته تغییرات مکانی تهیه می‌شوند (۴۰).

در یکی دو دهه اخیر، مطالعات زیادی در ایران و جهان پیرامون استفاده از روش‌های زمین‌آمار به منظور پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک صورت گرفته است. از جمله پژوهش‌های اخیر صورت گرفته 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 صورت گیرد (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 بالای

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 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 صورت‌گرفته 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 تغییرناهی تجربی عناصر تشخیص داده شدند. همچنین عناصر مس و روی به ترتیب دارای بیشترین و کمترین دامنه تأثیر بوده و بین دامنه تأثیر عناصر و ضریب تغییرات آنها رابطه خاصی مشاهده نشد (۳۳). از زمین‌آمار جهت مرزبندی محدوده‌هایی با مدیریت مشابه نیز استفاده شده است. از جمله زراعت‌پیشه و همکاران (۵۴) در مطالعه زمین‌آماری پیرامون مرزبندی مناطق مدیریتی یکسان در جنوب شرق استان فارس، از مجموع حدود ۲۰ داده مطالعه شده 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 نمودند.

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، به ترتیب دارای بیشترین کارایی در درون‌یابی بودند. مدل مناسب برای کلیه روش‌های درون‌یابی زمین‌آماري در کلیه 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 بالا در کاربری‌های مختلف است. مطالعات زمین‌آماري و پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک انجام‌شده در مناطق مختلف، نتایج متفاوتی را گزارش نموده‌اند که لزوماً قابلیت تعمیم نتایج آنها را به سایر مناطق ندارد. از این رو نیاز است که الگوی پراکنش مکانی متغیرهای خاک موردبررسی قرارگرفته و روش‌های مختلف زمین‌آماري 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 گرفت. نتیجه حاصل از این پژوهش توانایی ارائه پیشنهاداتی به‌منظور مدیریت بهتر اراضی این منطقه را خواهد داشت. همچنین با مقایسه آماری بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده 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 نمود.

## مواد و روش‌ها

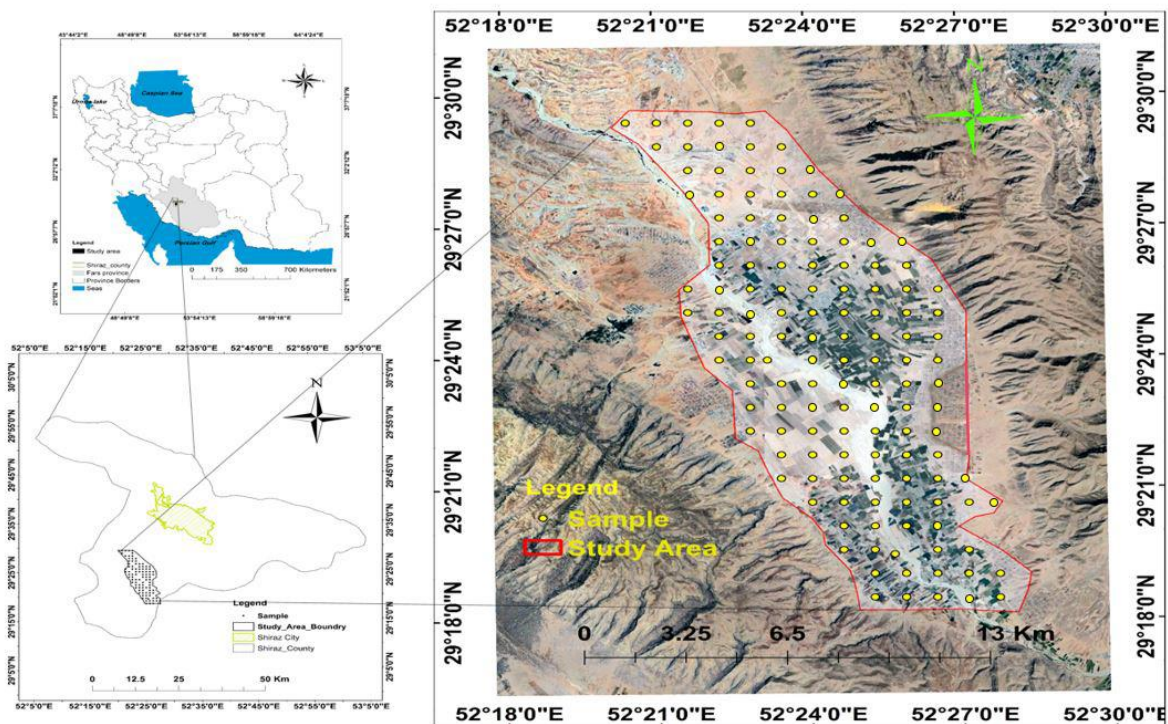
### منطقه مورد مطالعه

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° تا ۵۲°۲۰' تا ۱۲° تا ۵۲°۲۸' طول شرقی و ۱۰° تا ۲۹°۱۸' تا ۱۴° تا 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 (سنگ‌آهک و آهک دولومیتی)، جهرم (سنگ‌آهک فسیل‌دار و مارل)، آجاجاری (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 منطقه شامل مخروط‌افکنه‌های آبرفتی واریزه‌ای، فلات‌های مرتفع یا تراس‌های فوقانی و دشت‌های آبرفتی رودخانه‌ای هستند. رودخانه قره‌آجاج از بخش میانی دشت عبور کرده و منطقه مطالعاتی را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم نموده 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.

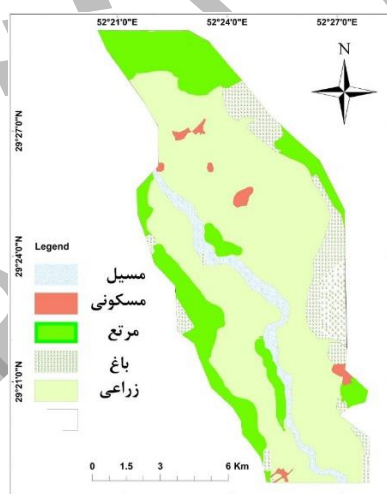
میزان بارندگی سالانه منطقه حدود ۳۴۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه هوا ۱۷/۱ درجه سلسیوس است. آب‌وهوای منطقه از نوع آب‌وهوای مدیترانه‌ای نیمه‌خشک معتدل طبقه‌بندی می‌گردد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به ترتیب زیریک و ترمیک هستند (۶). خاک‌های این منطقه براساس مطالعات زارعیان و حسن‌شاهی (۵۳) در چهار رده انتی‌سول، 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 کج‌دال (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.



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



شکل ۲. نقشه کاربری منطقه مطالعاتی دارنگان

## تحلیل داده‌ها

به منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آمار توصیفی ویژگی‌های خاک، توزیع فراوانی با کمک ویژگی‌های آن شامل میانگین، میانه، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی توسط نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۱ مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آزمون نرمال بودن داده‌ها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. همچنین، میانگین نتایج به دست آمده، با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم مقایسه شدند. محاسبه و رسم واریوگرام‌ها برای مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک، اعمال مدل‌های زمین‌آماری و رسم نقشه‌های پهنه‌بندی این مشخصه‌ها و به طور کلی مطالعات زمین‌آماری 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.

## مطالعات زمین آماری

نمونه‌های انتخاب شده در زمین آمار مستقل از جامعه نبوده بلکه تا فاصله مشخصی به صورت 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 این گونه 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 می‌باشند. 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 برازش شده با مدل‌های کروی و نمایی هستند. مهم‌ترین کاربرد واریوگرام، استفاده از اطلاعات آن در مدل‌های زمین آماری 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.

با توجه به اینکه محاسبه نیم‌تغییرنما برای همه جامعه مورد مطالعه امکان‌پذیر نیست، نیم‌تغییرنما در یک فاصله تفکیکی مشخص به وسیله تابع زیر تخمین زده می‌شود (رابطه ۱).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x=h) - Z(x)]^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن :

$\gamma$ ، نیم‌تغییرنما؛  $N(h)$ ، شمار جفت نمونه‌های به کاررفته در محاسبات به ازای هر فاصله و جهت تفکیک  $h$ ؛  $Z(x)$  متغیر مشاهده شده؛  $Z(x+h)$  متغیر مشاهده شده 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 گفته می‌شود. به مقدار نیم‌تغییرنما به ازای  $h=0$  اثر قطعه‌ای گفته می‌شود (۴۷). معمولاً اثر قطعه‌ای ناشی از خطاهای نمونه برداری، اندازه‌گیری و تجزیه داده‌ها است. مقادیر متغیر در نقاط فاقد آمار در کلیه روش‌های میان‌یابی زمین آماری از جمله کریجینگ با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (۱۲).

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{with} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه  $Z^*(x_0)$ : مقدار تخمین زده شده متغیر  $Z$  در نقطه‌ای به مختصات  $x_0$ ،  $Z(x_i)$ : مقدار مشاهده شده متغیر  $Z$  در نقطه‌ای به مختصات  $x_i$ ،  $\lambda_i$ : وزن یا اهمیت نسبت داده شده به متغیر  $Z$  در نقطه‌ای به مختصات  $x_i$  و  $n$ : تعداد نقاط همسایگی است.

روش‌های متفاوتی جهت برآورد متغیرهای وابسته به مکان وجود دارد که اختلاف عمده آن‌ها در محاسبه وزن‌هایی است که به نقاط مشاهده شده متغیر واقع در همسایگی نقطه مورد تخمین می‌دهد. درباره کیفیت برآورد تخمین‌گرها قضاوت

می‌شود. در نهایت با محاسبه چهار آماره شامل ضریب تبیین، میانه انحراف قدر مطلق<sup>۱</sup>، درصد خطای مطلق میانگین<sup>۲</sup> و میانگین مجذور خطای نرمال شده<sup>۳</sup> به منظور تعیین صحت مدل و مقایسه نتایج حاصل از تخمین گره‌های مختلف و انتخاب بهترین مدل با استفاده از روابط زیر اقدام گردید (۲۰).

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$MAPE = \left[ \frac{\sum (Z^*(x_i) - Z(x_i)) / (x_i)}{n} \right] * 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$NRMSE = (RMSE \times 100) / Z_{avg} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این روابط:  $Z^*(X_i)$  مقدار برآورد شده،  $Z(X_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده متغیر،  $Z_{avg}$  میانگین مقادیر مشاهده شده 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 می‌باشد (۱۹). با توجه به این که مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است، مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده برای دو متغیر با واحدهای متفاوت درست نخواهد بود. لذا 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. لازم به ذکر 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 گردید (جدول ۳). در نهایت، با استفاده از اطلاعات حاصل از محاسبات تغییرنا و انتخاب مناسب‌ترین روش میان‌یابی با بالاترین دقت اقدام به پهنه‌بندی متغیرهای مختلف گردید 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<sup>۴</sup> و زمین‌آماری انجام شد. در روش‌های قطعی یا معین، تنها از توابع ریاضی استفاده شده و مستقل از ارتباط مکانی بین مقادیر متغیرها می‌باشند. در این بررسی از روش‌های قطعی شامل چندجمله‌ای جهانی<sup>۵</sup>، میان‌یابی چندجمله‌ای محلی<sup>۶</sup>، وزن‌دهی فاصله معکوس<sup>۷</sup>، و تابع پایه شعاعی<sup>۸</sup> 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 مکان‌های اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود (۲۰). در این بررسی از روش‌های زمین‌آماری شامل کریجینگ، کوکریجینگ و کریجینگ تجربی بی‌زین<sup>۹</sup> 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،

<sup>1</sup> Mean Absolute Deviation (MAD)

<sup>2</sup> Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

<sup>3</sup> Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

<sup>4</sup> Deterministic

<sup>5</sup> Global Polynomial Interpolation; GPI

<sup>6</sup> Local Polynomial Interpolation; LPI

<sup>7</sup> Inverse Distance Weight; IDW

<sup>8</sup> Radial Basis Function; RBF

<sup>9</sup> Empirical Bayesian kriging

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 می‌باشند (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 بدست‌آمده 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.

جدول ۱. توصیف آماری ویژگی‌های حاصلخیزی خاک در منطقه مطالعاتی

متغیر	واحد	حداقل	حداکثر	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 <sup>-1</sup>	۶/۱۸	۱۷/۷	۱۱/۹	۲/۳۷	۱۹/۹	۰/۰۲	-۰/۸۱	۰/۰۷۵
P	mgkg <sup>-1</sup>	۲	۶۰	۱۳/۸	۸/۲۱	۵۹/۴	۲/۰۱	۵/۰۴	۰/۰۵۶
K	mgkg <sup>-1</sup>	۱۴۰	۶۲۸	۳۲۶/۴	۹۶/۶	۲۹/۶	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۱۵۷
Fe	mgkg <sup>-1</sup>	۲/۲۶	۴۷/۸	۸/۸۶	۶/۴۶	۷۲/۹	۳/۳۳	۱۵/۳	۰/۰۸۴
Mn	mgkg <sup>-1</sup>	۳/۵۲	۴۴/۲	۱۹/۱	۸/۲۶	۴۳/۲	۰/۱۶	۰/۴۳	۰/۱۰۳
Zn	mgkg <sup>-1</sup>	۰/۲۸	۳/۴۴	۰/۹۹	۰/۶۲	۶۲/۶	۱/۷۶	۳/۶۴	۰/۰۷۶
Cu	mgkg <sup>-1</sup>	۰/۶۴	۳/۷۲	۱/۷۲	۰/۵۲	۳۰/۲	۰/۸۷	۱/۹۴	۰/۰۹۴
Ca	mel <sup>-1</sup>	۲/۰	۳۸/۰	۱۲/۵	۹/۹۴	۷۹/۵	۱/۰۵	-۰/۱۷	۰/۰۶۱
Mg	mel <sup>-1</sup>	۱/۸	۳۷/۲	۹/۱۲	۶/۹۵	۷۶/۲	۱/۳۹	۲/۰۶	۰/۰۶۸

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 ویژگی‌های خاک منطقه قزوین اظهار نمودند که مقدار pH کمترین و مقادیر فسفر و پتاسیم، بیشترین ضریب تغییرات در بین متغیرهای مطالعه شده را داشته‌اند. کیوانی و همکاران (۲۶) نیز در منطقه شهرکرد به ترتیب کمترین و بیشترین ضریب تغییرات را برای pH و آهن گزارش نمودند. ضریب تغییرات کم در ویژگی‌های خاک ناشی از اثر عوامل ذاتی مانند مواد مادری در رفتار آن متغیر است. در حالی که 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 نرمال شدن توزیع فراوانی داده‌ها می‌شود.



در مطالعه زمین آماری صورت گرفته در شرق رود کارون در استان خوزستان توسط شهین زاده و همکاران (۴۳) ویژگی های شن (۵۶٪)، قابلیت هدایت الکتریکی (۴۹٪) و پتاسیم (۴۰٪) بیشترین و اسیدیته (۴٪) کمترین ضریب تغییرات را داشته اند. به منظور بررسی وجود یا عدم همبستگی بین ویژگی های اندازه گیری شده در منطقه مورد مطالعه، میزان ضریب همبستگی بین زوج پارامترها محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. از بین این ویژگی ها، نیتروژن کل و فسفر دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی دار در سطح یک و پنج درصد با بیشتر ویژگی ها بوده اند. متغیرهایی که دارای سطوح همبستگی بالایی هستند، بهترین انتخاب برای کمک به برآورد بهتر ویژگی های مورد مطالعه توسط روش های مختلف زمین آماری می باشند.

جدول ۲. ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی های مطالعه شده خاک

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

\* و \*\* به ترتیب معنی دار در سطح پنج و یک درصد آماری.

در پژوهش صورت گرفته در خاک های استان اصفهان، پیرامون توزیع مکانی برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک، به غیر از pH که با هیچ کدام از ویژگی های دیگر خاک همبستگی نداشته است، بقیه ویژگی های خاک دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی دار در سطح یک و پنج درصد بوده اند (۳۱). اطلاعات جدول ۲ برای انتخاب دو مشخصه یکی با بیشترین همبستگی معنی دار و دیگری با کمترین همبستگی، به عنوان متغیر کمکی در تحلیل های کوکریجینگ استفاده شد. با این حال در مورد سایر مشخصه ها 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 آماره های تخمین گر استفاده شده، به دست آمد (جدول ۳).

جدول ۳. پارامترهای واریوگرام و شاخص خطای تخمین برای ویژگی های مطالعه شده خاک

متغیر	مدل متغیر	اثر قطعه -	سقف	دامنه (متر)	اثر قطعه -	کلاس	میانگین	میانه	درصد	ضریب
نیتروژن	CoKriging-Simple-Tetraspherical	ای	۰/۷۲۶	۲۵۸۴	۴۱/۴۱	متوسط	۰/۱۷۹	۳/۲۵	۱۰/۷۸	۰/۵۶
فسفر	CoKriging-simple-Exponential	ای	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

## نشریه علوم آب و خاک

۰/۹۴	۵/۱۸۲	۰/۰۶۷	۰/۶۶۴	قوی	۰/۱	۲۰۶۵	۱۰۵/۹	۰/۱۰۵۹	CoKriging-simple-Stable	کلسیم
۰/۹۷	۱۳/۲۸	۰/۰۷۸	۰/۶۳۱	قوی	۲۱/۲۳	۴۶۳۸	۰/۸۰۷	۰/۱۷۱۴	CoKriging-simple-Pentaspheical	منیزیم
۰/۸۹	۲۷/۱۱	۰/۳۷۴	۲/۰۱۸	قوی	۰	۲۰۰۰	۱/۰۵۶	۰	CoKriging-J-Bessel	آهن
۰/۸۱	۴۳/۷۴	۰/۳۴۳	۵/۴۸۰	متوسط	۶۰/۱۱	۲۲۳۷	۰/۵۸۵	۰/۳۵۱۷	CoKriging-simple-Stable	منگنز
۰/۶۰	۴۵/۰۹	۰/۵۰۴	۰/۳۶۸	ضعیف	۱۵۴/۷۵	۱۳۰۳۷	۰/۴۶۹	۰/۷۲۵۸	Simple Kriging-Gaussian	روی
۰/۶۴	۱۴/۸۴	۰/۱۶۸	۰/۲۲۴	قوی	۰/۰۹۷	۲۰۴۸	۱/۱۲۵	۰/۰۰۱۱	CoKriging-simple-Rational Quadratic	مس
۰/۹۹	۱۲/۵۶	۰/۰۱۰	۰/۱۰۵	قوی	۰	۲۰۰۴	۷/۹۴۶	۰	CoKriging-Ordinary-spherical	CEC

جدول ۳ پارامترهای واریوگرام و شاخص خطای تخمین برای ویژگی‌های مطالعه شده خاک را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، با در نظر گرفتن آماره‌های مورد استفاده، بهترین مدل ساختار مکانی با بالاترین دقت، برای نیتروژن چهاروجهی کرومی، فسفر، نمایی ساده، پتاسیم و آهن، J-Bessel، کلسیم و منگنز، مدل stable، منیزیم پنج‌وجهی کرومی، روی مدل گوسی، مس مدل منطقی درجه دوم و ظرفیت تبادل کاتیونی مدل کرومی ساده بوده‌اند. برای متغیر روی روش کریجینگ ساده و برای سایر متغیرها روش کوکریجینگ استفاده گردید. ساختار مکانی برای نیتروژن، پتاسیم و منگنز متوسط و برای روی ضعیف و برای سایر متغیرها قوی به دست آمد.

ضریب تبیین بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در دامنه ۰/۵۶ (برای نیتروژن کل) تا ۰/۹۹ (برای ظرفیت تبادل کاتیونی) بدست آمده است. حداقل میانگین مجذور خطای نرمال شده به ترتیب برای ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۰۱)، کلسیم (۰/۰۶) و منیزیم (۰/۰۷) و حداکثر این آماره به ترتیب برای نیتروژن (۳/۲۵)، فسفر (۰/۰۵۶) و روی (۰/۵۰۴) محاسبه شد (جدول ۳). ضریب تبیین نسبتاً بالایی ( $R^2=0/55$ ) بین این دو شاخص خطا بدست آمد. همانگونه که قبلاً ذکر شد که مقادیر NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۲۰-۱۰ درصد مناسب بودن مدل، ۳۰-۲۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است. بر این اساس تمامی ویژگی‌های مطالعه شده دارای مدل دقیقی بوده‌اند.

ویژگی‌های خاک موجود در نقشه جهانی خاک در پژوهشی با استفاده از نقشه برداری 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 بررسی شده مقادیر نیتروژن و اسیدیته خاک بالاترین 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، در حالیکه ویژگی‌های نیتروژن، گوگرد و فسفر وابستگی مکانی متوسطی داشتند (۵۶).

ژینگایی و همکاران (۵۲) اظهار نمودند که روش کریجینگ توانایی درون‌یابی متغیرها با دقت زیاد را در مطالعه‌ای مرتبط با تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک با استفاده از زمین‌آمار داشته‌است. شعبانی و همکاران (۴۲) تغییرات اسیدیته و مقدار املاح محلول آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان در استان فارس را به روش زمین‌آمار مطالعه نمودند و اظهار کردند که روش کریجینگ ساده و معمولی نسبت به روش‌های وزنی عکس فاصله و تابع پایه شعاعی، به دلیل دارا بودن ضریب همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی بالاتر 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 گووسی 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 نیم‌تغییرنامه‌های 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 بالا 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 نمود 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. به عنوان مثال ویژگی‌هایی که وابستگی مکانی متوسطی دارند این امکان را دارند که در 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 (۲۰۱۶ تا ۲۰۰۰ 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 نمود. بر این 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. به طور کلی دامنه تأثیر، فاصله‌ای است که در مقادیر بالاتر 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 مورد نظر را مشخص ساخته و اطلاعاتی در رابطه با حد مجاز فاصله نمونه‌برداری را ارائه می‌کند. در پژوهشی به منظور بررسی تغییرات مکانی برخی از ویژگی‌های خاک در شرق شیراز، وابستگی هر یک از متغیرها نسبت به مکان بررسی گردید. از بین متغیرها، اسیدپته 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 زمین‌آماري صورت گرفته در استان خوزستان دامنه تأثیر ویژگی‌های اسیدپته و شن (۶۱۱ متر)، قابلیت هدایت الکتریکی (۲۵۶ متر)، سیلت (۲۵۴ متر)، پتاسیم (۲۵۳ متر)، رس (۲۵۲ متر) و کربنات کلسیم معادل (۳۲ متر) به دست آمد. همچنین روش پایه شعاعی برای تخمین مقادیر ویژگی‌های شن، قابلیت هدایت الکتریکی، سیلت و کربنات کلسیم معادل، و روش کریجینگ معمولی برای تخمین مقادیر اسیدپته، پتاسیم و رس دقت بالاتری داشته‌اند (۴۳). در مطالعه زمین‌آماري برخی ویژگی‌های خاک در اراضی جنگلی تحت فرسایش در استان کهگیلویه و بویراحمد، کلاس همبستگی مکانی قوی برای ویژگی‌های مورد مطالعه گزارش و آنرا گواهی بر الگوی پیوسته تغییرات مکانی آن ویژگی‌ها و کارایی فاصله نمونه‌برداری در انعکاس تغییرات مکانی متغیرهای مورد بررسی گزارش نمودند (۳۲). توزیع مکانی ویژگی‌های خاک در منطقه‌ای در استان گلستان ایران مورد بررسی قرار گرفت. از میان ویژگی‌های مطالعه شده، پتاسیم (۹۴ متر) بیشترین

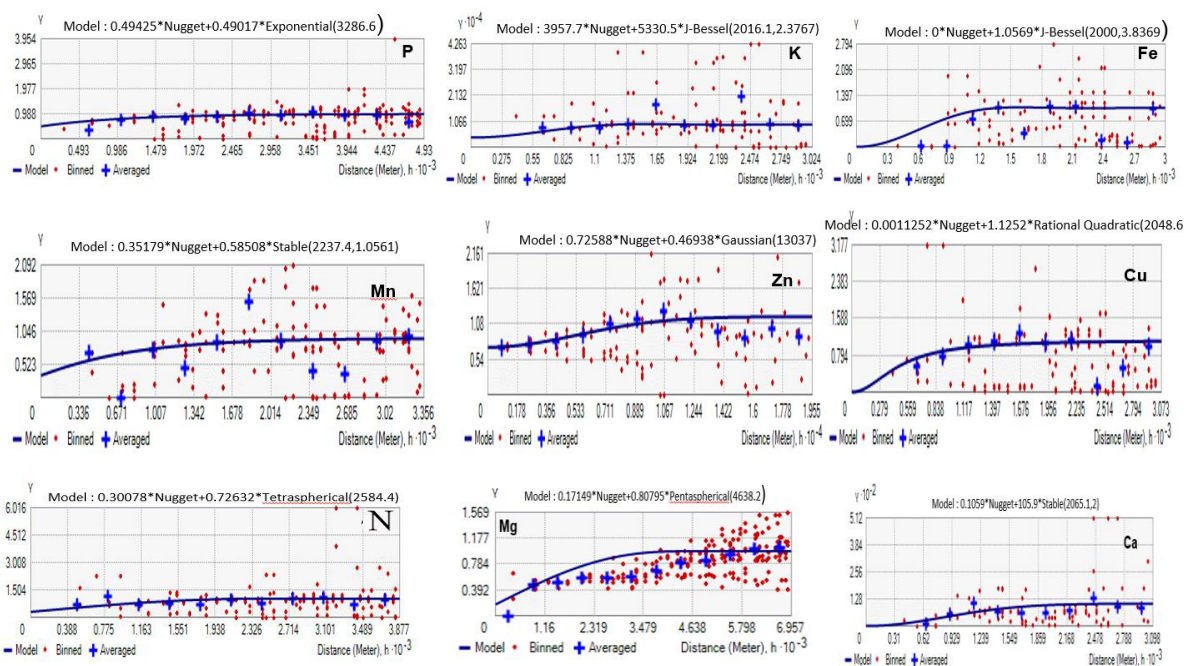
## نشریه علوم آب و خاک

و نیترات 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 زمین‌آماري کریجینگ معمولی و کلاسیک مورد بررسی قرار گرفت. 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 برازش شده برای مناسب‌ترین مدل‌های ذکر شده در جدول ۳ برای پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. آنچه از نتایج این بررسی برمی‌آید حکایت از برتری مدل‌های زمین‌آماري بر مدل‌های قطعی آزمون شده در این بررسی در مورد ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک دارد. شایان ذکر است تغییر ابعاد شبکه آماربرداری بر دقت مدل و انتخاب آن نقش مؤثری دارد. بنابراین، نتایج این بررسی صرفاً برای شبکه آماربرداری ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه اعتبار دارد. انتخاب اندازه شبکه نمونه‌برداری جهت مطالعات زمین‌آماري 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 طبعاً بسته به نوع منطقه مطالعاتی، نوع تغییرپذیری ویژگی مورد نظر و اثرات مدیریتی اراضی بر آن ویژگی فاصله نمونه‌برداری می‌تواند متفاوت باشد.



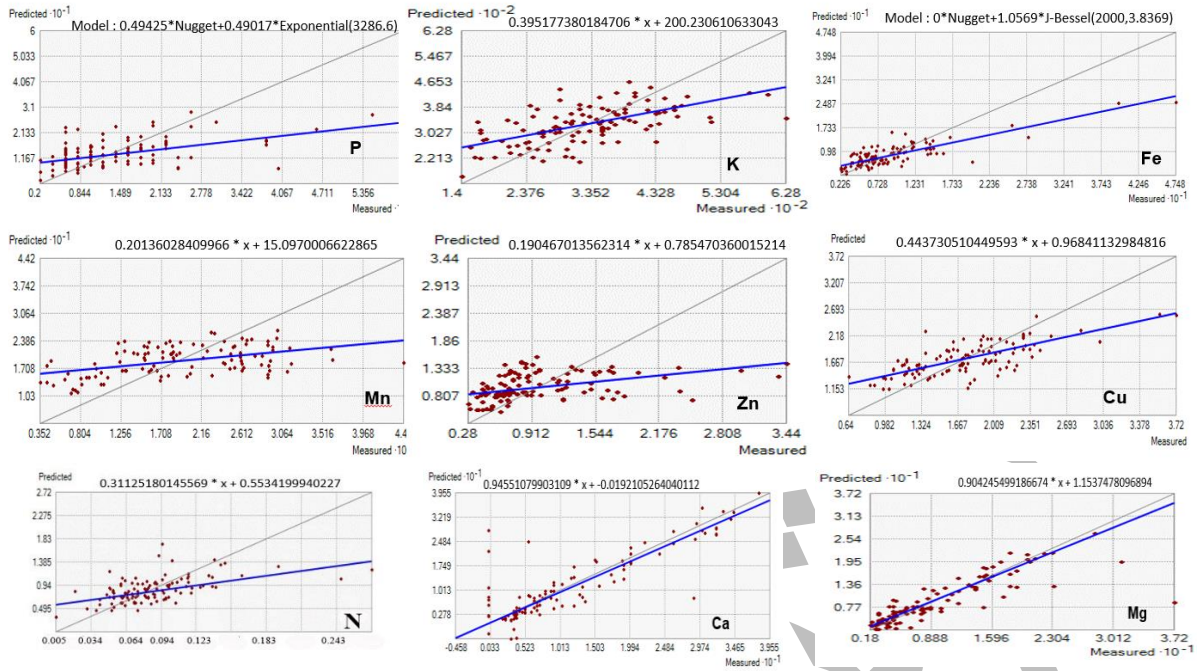
شکل ۳. نیم‌تغییرنماهای ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

مقایسه بین نمودار نیمه متغیرنماها، نمودار برازش مدل ارزیابی دقت (میانگین مجذور خطای نرمال شده) برای مشخصه‌هایی که دارای ساختار مکانی ضعیف (عنصر روی) و متوسط (نیتروژن، پتاسیم و منگنز) هستند با آن‌هایی که دارای ساختار مکانی قوی هستند نشان می‌دهد که نمودار نیم تغییرنماها (شکل ۳) مربوط به متغیرهای با ساختار مکانی ضعیف و متوسط به‌طور کلی دارای اثر قطعه‌ای بزرگ‌تری نسبت به نمودار نیم تغییرنمای مربوط به گروه قوی هستند، درحالی‌که در آن‌ها پراکنش نقاط حول نمودار برازش شده نامتقارن‌تر و پراکنده‌تر است. بنابراین می‌توان به تأثیر منفی اثر قطعه‌ای بر ساختار مکانی مدل‌ها اشاره نمود. 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 زمین‌آماری و آمار قطعی آزمون شده در این مطالعه بررسی شود.

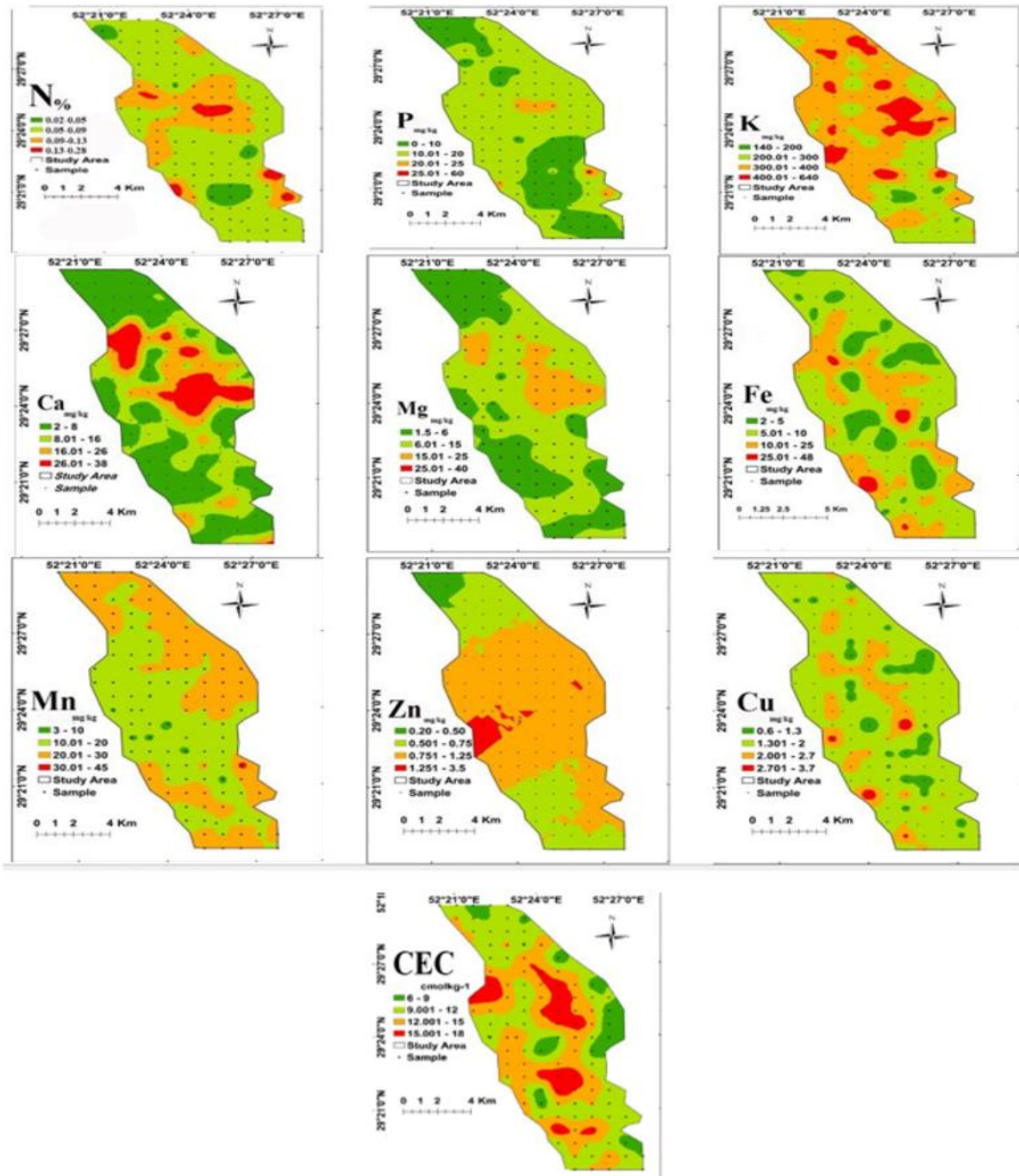
دامنه تأثیر را می‌توان به‌عنوان حد قابل قبول برای ابعاد شبکه آماربرداری در نظر گرفت؛ چرا که با توجه به شکل ۳، در این فاصله تغییرات نیمه تغییرنما ثابت شده و با افزایش بیشتر فاصله، تغییری در اختلاف داده‌ها ایجاد نمی‌شود (۱). به عبارت دیگر هر چه فاصله نمونه‌برداری‌ها از دامنه تأثیر کمتر باشد، شباهت داده‌ها به هم بیشتر است. این موضوع می‌تواند راهنمایی برای تنظیم شبکه آماربرداری برای نمونه‌برداری مشخصه‌های مورد 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 مورد اشاره خاک در نرم‌افزار، مناسب‌ترین مدل با بالاترین دقت و صحت و پایین‌ترین میزان میانگین مجذور خطا بر نیم‌تغییرنمای طراحی شده بر روی داده‌های آن مشخصه برازش گردید. از طرفی در هر سری تحلیل داده برای هر یک از مشخصه‌های مورد نظر چنانکه در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، بسیاری از پیش‌فرض‌های نرم‌افزار برای انجام تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این موضوع برای نرم‌افزارهای مشابه در دسترس نیز صادق می‌باشد که باعث بالا رفتن احتمال خطای کاربر در انتخاب دقیق‌ترین مدل‌ها شده و از طرفی به دلیل انتخاب پیش‌فرض‌های نرم‌افزار، راه انتخاب گزینه‌ها محدود شده و 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 داده‌شود؛ به طوری که دقیق‌ترین و مناسب‌ترین مدل‌ها از آزمون و مقایسه گزینه‌های مختلف پیش‌فرض حاصل آید، که مسلماً نتیجه با آنچه در این مطالعه به صورت تحلیل انفرادی برای هر کدام از مشخصه‌های خاک بدست 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.

## نشریه علوم آب و خاک



شکل ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ویژگی‌های خاک



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

## نشریه علوم آب و خاک

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

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

	سطح ۱		سطح ۲		سطح ۳		سطح ۴	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
نیتروژن	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 پیشنهاد شده برای غلظت عناصر غذایی در خاک‌های زراعی و باغی ایران.

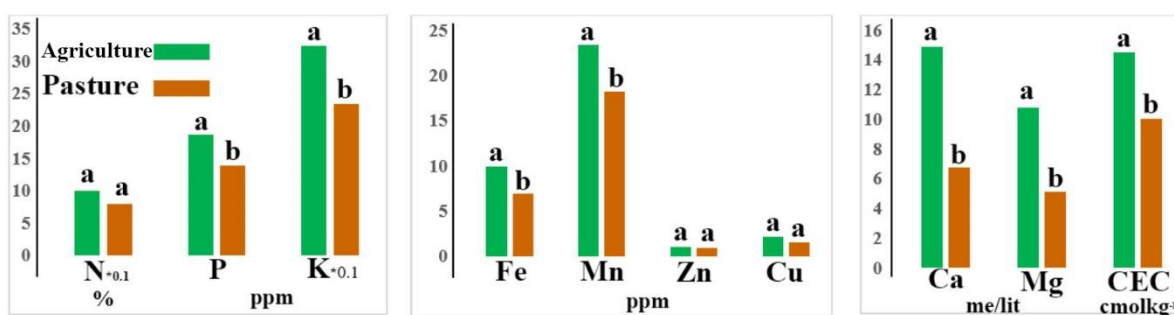
مس	روی	منگنز	آهن	پتاسیم	فسفر	نیتروژن کل	کربن آلی
۱	۱	۸	۱۰	۳۰۰	۱۰	۰/۱۶	۲
							mgkg <sup>-1</sup>
							%

نتایج مقایسه آماری ویژگی‌های مطالعه شده 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. تحقیقات زیادی در ارتباط اثر نوع کاربری بر تغییر ویژگی‌های خاک انجام گرفته 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، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و عناصر ریزمغذی شده است.



(۳). تغییر کاربری از زراعت به جنگل در طی حدود ۲۰ سال در جنوب چین منجر به افزایش مواد آلی (۲۱٪)، نیتروژن کل (۱۸٪)، نیتروژن قابل دسترس (۶۵٪)، فسفر قابل دسترس (۱۷٪) و پتاسیم قابل دسترس (۱۷٪) شد (۱۴).

باقرزاده و همکاران (۵) با استفاده از زمین آمار، پهنه‌بندی سه عنصر ازت، فسفر و پتاسیم را در ۲۵۰۰ هکتار از اراضی گندم‌کاری استان خراسان انجام دادند. نتایج نشان داد که با توجه به نیاز تغذیه‌ای گندم، در کل محدوده مورد مطالعه، مجموعاً ۱۵۸۰۰۰ کیلو گرم انواع کود، بیش از نیاز به مصرف می‌رسد. با انجام این پژوهش‌ها می‌توان با تعیین مقدار نیاز واقعی کود مصرفی در مزرعه ضمن 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 به مرور می‌توانند همبستگی مکانی متغیرهای خاک را تحت تأثیر قرار دهند.



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

### 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 مورد استفاده، بهترین مدل ساختار مکانی با بالاترین دقت، برای فسفر، نمایی ساده، پتاسیم و آهن، J-Bessel، کلسیم و منگنز، مدل stable، نیتروژن و منیزیم، چندوجهی کروی، 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 مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در دامنه ۵۶٪ (برای نیتروژن) تا ۹۹٪ (برای ظرفیت تبادل کاتیونی) بدست آمده است. حداقل میانگین مجذور خطای نرمال‌شده برای ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۰۱) و حداکثر 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، درحالی‌که در آن‌ها پراکنش نقاط، حول نمودار برازش شده نامتقارن‌تر و پراکنده‌تر است. مطالعه نیم‌تغییرنماهای برازش شده برای مناسب‌ترین مدل‌های انتخاب شده برای پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک در منطقه، بیانگر برتری مدل‌های زمین‌آماری بر مدل‌های قطعی آزمون‌شده در مورد ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک دارد.

بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی، ۹۶، ۲۸ و ۲۴ درصد از اراضی مورد مطالعه به ترتیب 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 مطالعه شده 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 به ترتیب 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 منطقه و مناطق مشابه، فاصله مکان‌های نمونه‌برداری خاک بر اساس دامنه تأثیر مشخصه مورد نظر انجام شود. با توجه به نتایج، مشخص شد که مدل‌سازی بر مبنای زمین‌آمار به‌خوبی توانائی 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 به منظور کاهش مصرف سم و کود و حفظ محیط‌زیست باشد. استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، جنگل‌های تصادفی، یادگیری ماشین و غیره به منظور مقایسه عملکرد مدل‌ها در برآورد مقدار ویژگی‌های خاک توصیه می‌شوند.

## References

- Alizadeh, A., A. Sheykhslami, 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 Persian)
- Arrouays, D., McBratney, A., Bouma, J., Libohova, Z., Richer-de-Forges, A.C., Morgan, C. L., and Mulder, V.L. 2020. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Reg.* 20, e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
- Askari, S., Owliaie, H.R., Safari, Y., and Sedghi Asl, M. 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 Persian)
- 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 Persian)
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08457-6>

8. Behnam, V., A. Gholamalazideh 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.
9. Bijanzadeh, 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: 35-46.
10. 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
11. Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, soil survey investigations report 42.
12. 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: 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: 446-452.
15. Chen, S., D. Arrouays, Leatitia Mulder, V., Poggio, L. 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: 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 Persian)
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, 483p.
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, 327-330. doi: 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 Persian)
23. Johnson, K., J. M., Ver Hoef, K. Krivoruchko. and N. Lucas. (2001). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. GIS by ESRI. Redlands, USA. 306 p.
24. Karlen, D.L., S.S., Andrews, B.J., Wienhold, and T.M. Zobeck. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. 1203.
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 Persian)
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: 202-215. (In Persian)
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, 195-213.
28. Lindsay, W.L., and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 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 Sci. Soc. Am. J.* 84: 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. Technical issue (No. 406). Agricultural Education Publication, Tehran, IR. (In Persian)
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 Persian)
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 Persian with English Abstract)
34. Olsen, S. K., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus in: Page, A.L. et al. (eds.) *Methods of soil analysis* 2<sup>nd</sup> Ed. part2 (pp. 403-430). Am. Soc. Agron. Inc. Madison, Wisconsin, New York. 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 Persian)
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. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367197.669596> (In Persian)
37. Page, A. L., R. H. Miller and D.R. Keeney 1982. *Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties.* 2, 643-698.
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 Persian)
39. Qu, L., H. Lu, Z. Tian, J.M. Schoorl, 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, 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 Persian)
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: 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, Technical Bulletin No. 42, IIVR, Varanasi, pp. 1-50.
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
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., Zareabyaneh, 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: 141-150. (In Persian)
49. Wackernagel, H. 2003. Geostatistical models and kriging, *IFAC Proceedings*, 36, 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, 20-33.
51. Webster, R., and M.A. Oliver. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Chichester: John Wiley and Sons.
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). Final report of the research project. *Soil and Water Research Institute*. Tehran, Iran (In Persian)
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
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*, 6639180 | <https://doi.org/10.1155/2021/6639180>



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

Hamidreza Owliaie<sup>\*1</sup>, Alireza Salehi<sup>2</sup>, Gholamreza Zareian<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Corresponding Author, Department of Soil Science, Yasouj University  
Email: owliaie@gmail.com

<sup>2</sup> Department of Forestry, Range and Watershed Management, Yasouj University

<sup>3</sup> Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz

**Abstract** The spatial distribution of soil characteristics is considered as 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 the zoning of some characteristics of the Darnagan area with different land uses agricultural (crop and horticultural) and pasture in the southwest of Shiraz. 134 surface soil samples were taken with a grid pattern from three different land uses, and some of their fertility characteristics were measured. The results revealed that, based on precision criteria, exponential co-kriging was the best method for interpolating P, J-Bessel for K and Fe, stable model for Ca and Mn, tetraspherical model for N and Mg, Gaussian model for Zn and rational quadratic model for Cu. The spatial structure was obtained for Zn, weak, for N, K, and Mn, medium, and for the other variables, strong. 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 showed a significant difference in the amounts of P, K, Fe, Mn, Ca, Mg, and CEC in different land uses.

**Keywords:** Spatial variability, Semi-variable, Nutrient elements, Geostatistical model