Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Assessment of geostatistical models for zoning spatial distribution of some soil properties in Darengan region with different land uses, Fars province

Hamidreza Owliaie[1]✉ | Alireza Salehi[2] | Gholamreza Zareian[3]

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Yasouj, Yasouj, Iran. E-mail: owliaie@gmail.com
2. Department of Forestry, Range and Watershed Management, Agricultural and Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: asalehi@yu.ac.ir
3. Department of Soil and Water Research, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran. E-mail: gh.zareian@areeo.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 25, 2023

Revised: Dec. 18, 2023

Accepted: Dec. 26, 2023

Published online: March. 2024

Keywords:
Zoning,
Spatial Variability,
Semi-Variable,
Soil Properties.

ABSTRACT

Determination of the physico-chemical characteristics of soil for sustainable agriculture on large scales is an important factor in achieving a precision agriculture. Different land use and management practices greatly impact soil properties, and knowledge of the variation in soil properties within different land uses, is essential in determining production constraints related to soil characteristics. Laboratory analyses of the soil properties are usually expensive and time consuming. Surmounting these problems is possible using geostatistics. This study was conducted to assess geostatistical methods for the spatial distribution of some soil properties of Darengan region with different land uses in Fars province. 134 surface soil samples at an interval of 1.0 × 1.0 km on a grid design were taken from pasture and agricultural land uses. Physico-chemical characteristics of the soil samples were analyzed. According to the results, the best spatial structure model with the highest accuracy was exponential model for the variables of sand, EC, CCE, pH, and BD, rational quadratic model for silt, and spherical model for clay, OC, and CEC. The spatial structure was weak for CCE, medium for organic carbon, and strong for the other variables. Among the characteristics studied, the variables of silt, clay and cation exchange capacity have the lowest range, and EC has the highest range. Based on the zoning map of the studied properties, the areas with agricultural land use had greater OC, clay, CEC, EC and lower pH. Understanding soil properties with their spatial dependency is of crucial importance for understanding the behavior of soil and hence providing better soil management.

Cite this article: Owliaie, H. R., Salehi, A., & Zareian, Gh. (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

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367197.669596

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ارزیابی روش‌های زمین‌آمار برای پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان با کاربری‌های مختلف، استان فارس

حمیدرضا اولیایی[۱]✉| علیرضا صالحی[۲] | غلامرضا زارعیان[۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: owliaie@gmail.com

۲. گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج. یاسوج، ایران. رایانامه: abcdef@ut.ac.ir

۳. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران رایانامه: abcdef@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۵

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
پهنه‌بندی،
تغییرپذیری مکانی،
نیم‌تغییرنما،
ویژگی‌های خاک.

چکیده

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌منظور مدیریت پایدار در مقیاس‌های بزرگ، عامل مهمی در دستیابی به کشاورزی دقیق است. استفاده از اراضی و شیوه‌های مدیریتی مختلف به‌شدت بر ویژگی‌های خاک تأثیر می‌گذارد و آگاهی از تغییرات این خصوصیات در کاربری‌های مختلف، در تعیین محدودیت‌های تولید ضروری است. تجزیه‌های آزمایشگاهی خاک، معمولاً پرهزینه و زمان‌بر است. یکی از راهکارهای رفع این مشکل استفاده از زمین‌آمار است. این پژوهش به‌منظور ارزیابی روش‌های زمین‌آماری برای پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان با کاربری های مختلف در استان فارس انجام پذیرفت. ۱۳۴ نمونه خاک سطحی با الگوی شبکه‌ای یک در یک کیلومتر، از دو کاربری مرتعی و زراعی-باغی از منطقه برداشت و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیائی اندازه-گیری شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، بهترین مدل ساختار مکانی با بالاترین دقت، برای متغیرهای مقادیر شن، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، پ‌هاش و چگالی ظاهری مدل نمایی، برای مقدار سیلت، مدل منطقی درجه دوم و برای مقادیر رس، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی مدل کروی بود. ساختار مکانی برای کربنات کلسیم معادل ضعیف، برای کربن آلی متوسط و برای سایر متغیرها قوی به‌دست آمد. از بین ویژگی‌های موردمطالعه، سیلت، رس و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای کمترین دامنه تأثیر و هدایت الکتریکی بیشترین دامنه تأثیر را داشته است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی ویژگی‌های موردمطالعه، مناطقی که دارای کاربری زراعی-باغی بوده‌اند، دارای کربن آلی، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر و پ‌هاش کمتر بودند. نتایج این مطالعه قابلیت روش‌های زمین‌آماری و GIS را به عنوان ابزار قدرتمندی به‌منظور مدیریت مکانی ویژگی‌های خاک را نشان داد.

استناد: اولیایی، حمیدرضا؛ صالحی، علیرضا؛ و زارعیان، غلامرضا (۱۴۰۳). ارزیابی روش‌های زمین‌آماری جهت پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان با کاربری های مختلف، استان فارس، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۱)، ۱۱۶-۹۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367197.669596

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367197.669596

مقدمه

برای حفظ منابع خاک برای آیندگان، نیاز فوری به بهبود روش‌های مدیریتی وجود دارد که به اطلاعات مکانی دقیق از خاک برای تصمیم‌گیری نیاز دارد. نقشه‌برداری خاک، طبقه‌بندی و مدل‌سازی پدولوژیک در میان اولین مطالعات علمی مرتبط با خاک‌ها بوده که نقش مهمی در بهبود درک ما از خاک داشته است (Zhang et al., 2023). نقشه‌برداری رقومی خاک با ادغام بررسی‌های خاک، زمین‌آمار، ماشین‌های یادگیری، سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور به‌عنوان، زیرشاخه‌ای از علم خاک در حال رشد سریع است (Minasny and McBratney, 2016).

عوامل ژنتیکی، محیطی و انسانی موجب می‌شوند که خاک دارای ویژگی‌های پیچیده و متغیری در ابعاد مکانی و زمانی شود. اهمیت وجود تغییرات مکانی در ویژگی‌های خاک بدیهی بوده و با آنکه دلایل تغییرات در نقاط مختلف متفاوت است، اما درک منابع ایجاد تغییر کاربران اراضی را در مدیریت بهتر آن کمک می‌نماید. ویژگی‌های خاک دارای تغییرات مکانی و زمانی در مقیاس‌های مختلف بوده که ناشی از ویژگی‌های ذاتی (مانند عوامل تشکیل خاک از جمله مواد مادری) و خصوصیات غیر ذاتی (مانند عملیات مدیریتی خاک) قرار می‌گیرد (Quine and Zhang, 2002).

شارما و همکاران (۲۰۱۱) بیان نمودند که کاربرد یکنواخت نهاده‌های کشاورزی بدون توجه به تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک، می‌تواند علاوه بر کاهش نسبی محصول، موجب افزایش آلودگی محیط‌زیست ناشی از کاربرد بیش‌ازحد نهاده‌های مصرفی شود. تقاضای زیاد کاربران اراضی در سال‌های اخیر به‌منظور دست‌یابی به اطلاعات بسیار دقیق از تغییرات مکانی خاک‌ها برای سامانه‌های مدیریتی و زیست‌محیطی، تاییدکننده این مورد است. دراین‌ارتباط، راهکارهای توسعه‌یافته در قالب مجموعه آمار مکانی از جمله تکنیک زمین‌آمار، راهگشا بوده‌اند (Chen et al., 2009). تغییر کاربری جنگل‌ها و مراتع به اراضی زراعی به یکی از نگرانی‌های قابل‌توجه در سطح دنیا از دیدگاه تخریب محیط‌زیست و تغییر اقلیم جهانی تبدیل‌شده‌است. سالانه حدود ۴۳۰ میلیون هکتار از اراضی مرتعی و جنگلی دنیا به زمین‌های کشاورزی تبدیل می‌شوند که حدود ۳۰ درصد کل زمین‌های شخم‌خورده دنیا می‌باشد (Wali et al.,1999).

زمین‌آمار، بخشی از علم آمار است که در آن مختصات داده‌های مربوط به محیط، بررسی و ساختار مکانی متغیرهای محیطی با استفاده از روابط آماری، مدل‌سازی می‌شود. استفاده از روش‌های پهنه‌بندی مانند واریوگرافی، کریجینگ و کوکریجینگ، این امکان را ایجاد می‌کند تا از نتایج تخمین، به اطلاعات کاربردی و مفیدی دسترسی پیدا نموده و در راستای هرچه بهترِ مدیریت پایدار خاک‌ها از آن‌ها استفاده کرد (Sarangi et al., 2006). در این راستا، شناسایی الگوی تغییرات مکانی متغیرها و برازش یک مدل آماری مناسب بر آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. میزان تغییرپذیری مکانی متغیرها تابع درجه وابستگی مکانی آنها است که با آگاهی از ویژگی‌های ذاتی و محیطی، برای اکثر ویژگی‌های خاک قابلیت ساخت مدل را دارد. در زمین‌آمار وابستگی مکانی متغیرهای اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله واریوگرام (تغییرنما) محاسبه می‌شود. یک تغییرنمای ایده‌آل دارای سه پارامتر اثر قطعه‌ای، حد آستانه و دامنه تأثیر است (Cao et al., 2011).

هزینه‌های زیاد جمع‌آوری نمونه‌های خاک، غیرقابل دسترس بودن برخی نقاط منطقه مورد مطالعه و هزینه‌های بالای تجزیه نمونه‌های خاک، ارائه روش‌هایی را به منظور برآورد غیرمستقیم ویژگی‌های خاک طلب می‌کند. نمونه‌ای از این روشهای غیرمستقیم ، استفاده از مدل‌های زمین‌آماری است که 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 به‌منظور پیوسته‌سازی الگوی تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای انجام می‌شود. در نهایت، با پهنه‌بندی مقادیر برآورد شده متغیرهای مختلف، نقشه‌های پیوسته تغییرات مکانی تهیه می‌شوند. روش‌های زمین‌آماری، امکان درک چگونگی اثرپذیری متغیرها از شرایط جغرافیایی را فراهم می‌کنند (Santra et al., 2008). ترکیب مناسب از دو عامل تراکم نمونه‌برداری و نوع مدل، برای پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک در منطقه‌ای در شرق کشور چین مهم تشخیص داده شد و پیشنهاد شد که توجه بیشتری به ساختار مکانی متغیرهای هدف و رابطه آنها با متغیرهای کمکی محیطی صورت گیرد (Qu et al., 2024).

در پژوهشی، تغییرپذیری مکانی برخی ویژگی‌های حاصلخیزی خاک متأثر از تغییرات کاربری اراضی در منطقه یاسوج بررسی شد. بررسی نیم‌تغییرنماهای متغیرهای مورد مطالعه نشان داد که مدل کروی نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری داشته است. برای درون‌یابی مقادیر عناصر منگنز و پتاسیم در فضای نمونه‌برداری، تخمین‌گر فاصله معکوس وزنی (IDW) و برای سایر عناصر، تخمین‌گر کریجینگ بهتر عمل نمود. کلاس هم‌بستگی مکانی الگوی تغییرات عناصر نیتروژن، مس و آهن، قوی و برای عناصر فسفر و روی متوسط بود

(عسکری و همکاران، ۱۳۹۸).

روش‌های زمین‌آماری برای تخمین و پهنه‌بندی عناصر پرمصرف اولیه در استان گلستان، موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش کریجینگ با داشتن بالاترین صحت و کمترین خطا، بهترین الگو برای تخمین نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌استفاده در این منطقه بوده است. تجزیه‌وتحلیل نیم تغییرنماها نشان داد که نیتروژن کل و پتاسیم قابل‌استفاده با مدل نمایی و فسفر قابل‌استفاده با مدل کروی بهترین برازش را داشتند (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۱).

دامنه تأثیر ویژگی‌های خاک، تابعی از مقیاس موردمطالعه و فاصله نمونه‌برداری است. کمتر بودن دامنه تأثیر، نشان‌دهنده تغییر و ناهمگونی بیشتر آن در منطقه موردمطالعه که ناشی از عوامل مدیریتی (از جمله تغییر کاربری، مدیریت آبیاری، شخم، کوددهی و...) است (فروغی‌فر و همکاران، ۱۳۹۰). در تحقیقی با بررسی پهنه‌بندی و تحلیل مکانی برخی ویژگی‌های خاک در اراضی دانشگاه زنجان نشان داده شد که برای متغیرهای درصد کربن آلی و کربنات کلسیم معادل، مدل کروی و برای سایر متغیرها، مدل نمایی بهترین برازش را داشتند (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۸). زمین‌آمار به‌منظور جداسازی واحدهای مدیریتی مشابه نیز استفاده می‌شود. از جمله Zeraatpisheh et al. (2022) در مطالعه زمین‌آماری پیرامون مرزبندی مناطق مدیریتی یکسان در جنوب ایران، از مجموع ۱۹ویژگی مطالعه‌شده خاک، پنج ویژگی شامل چگالی ظاهری، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، سیلت و آهن را به‌عنوان داده‌های حداقلی برای تفکیک واحدهای مدیریتی همگن و خالص معرفی نمودند.

منطقه مورد مطالعه یکی از مناطق مستعد کشاورزی با تنوع در کاربری‌های مختلف، پستی‌وبلندی و مواد مادری است. ازآنجایی‌که مطالعه‌های انجام گرفته در مناطق مختلف نتایج متفاوتی دارد و نمی‌توان این نتایج را به سایر مناطق تعمیم داد، نیاز است که الگوی پراکنش مکانی متغیرهای خاک موردبررسی قرارگرفته 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 فیزیکوشیمیایی منطقه و تهیه نقشه‌های توزیع‌مکانی با استفاده از مناسب‌ترین مدل‌های پیشنهادی و همچنین مقایسه ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف انجام گرفت. نتیجه حاصل از این پژوهش می‌تواند پیشنهاداتی برای مدیریت بهتر اراضی منطقه مورد استفاده ارائه نماید. همچنین با مقایسه آماری بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های تایید شده می‌توان برای پیشنهاد مناسب‌ترین ابعاد شبکه نمونه‌برداری خاک به منظور افزایش دقت و کاهش هزینه، در منطقه موردمطالعه اقدام نمود.

مواد و روش‌ها

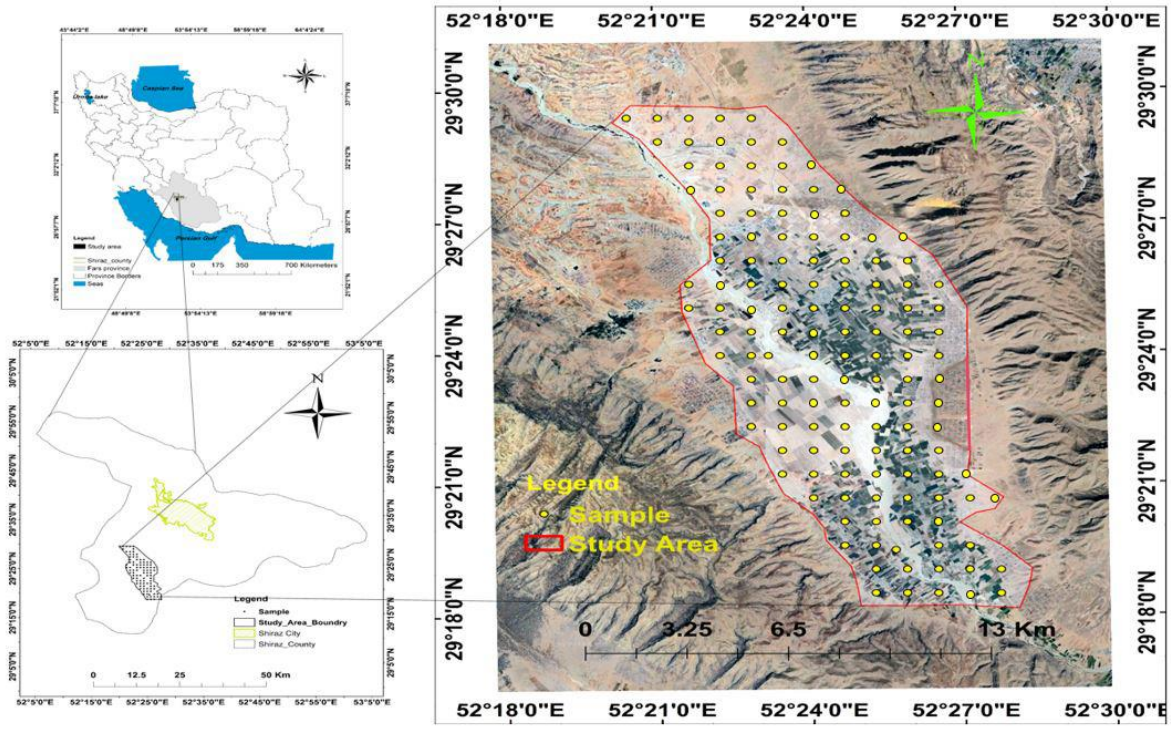
منطقه مورد مطالعه

منطقه‌موردمطالعه با وسعتی حدود ۲۰ هزار هکتار در ۴۰ کیلومتری جنوب غرب شهر شیراز و در مرکز استان فارس قرار دارد. دشت دارنگان در محدوده زون ۳۹ حدفاصل عرض جغرافیایی ۶۳۴۵۳۰ تا ۶۴۰۲۵۶ متر شمالی و طول جغرافیایی ۳۲۴۳۰۲۸ تا ۳۲۵۵۸۵۰ متر شرقی قرار گرفته است. از نظر موقعیت از شرق به کوه سبزپوشان یا قبله شیراز، از جنوب به بند بهمن و کوه مُل بلند و از غرب به کوه میشدان و کوه دلو و از شمال به ارتفاعات خانه خبیس محدود شده‌است. ارتفاع منطقه موردمطالعه بین ۱۶۷۷ تا ۱۸۸۵ متر از سطح دریا قرار دارد. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه دارای سازندهای آسماری (سنگ‌آهک و آهک دولومیتی)، جهرم (سنگ‌آهک فسیل‌دار و مارل)، آغاجاری (ماسه‌سنگ، کنگلومرا و مارن شنی)، سازند رازک (ماسه‌سنگ و مارن، گچ)، بختیاری (کنگلومرا) و رسوبات آبرفتی (لای و رس) دوران چهارم است (زارعیان و حسن‌شاهی، ۱۳۸۳). رودخانه قره‌آغاج از بخش میانی دشت عبور کرده و منطقه مطالعاتی را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم نموده است. واحدهای فیزیوگرافی این منطقه شامل مخروط افکنه‌های آبرفتی واریزه‌ای، فلات‌های مرتفع یا تراس‌های فوقانی و دشت‌های آبرفتی رودخانه‌ای هستند. 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.

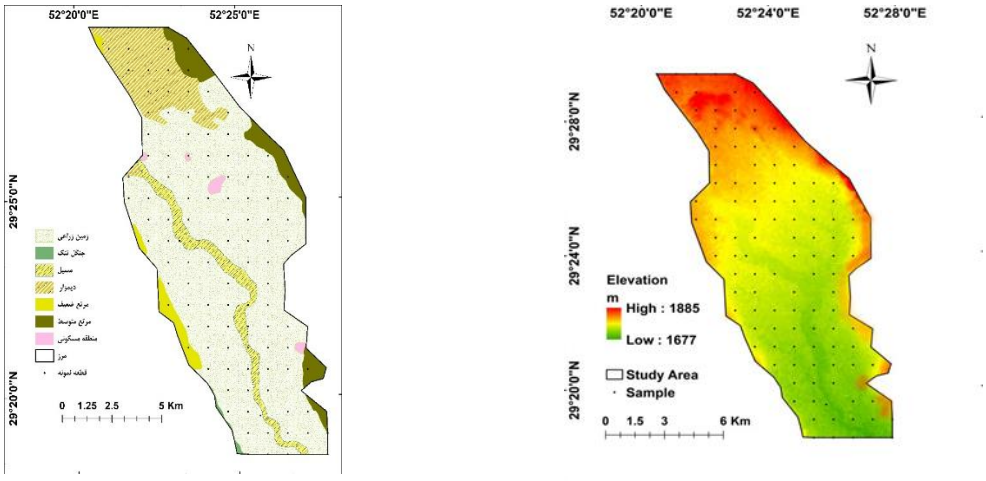
میزان بارندگی سالیانه منطقه حدود ۳۴۰ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالیانه هوا ۱۷/۱ درجه سلسیوس است. آب‌وهوای منطقه از نوع آب‌وهوای مدیترانه‌ای نیمه‌خشک معتدل طبقه‌بندی می‌گردد. مجموع تبخیر سالیانه از تشت تبخیر ۲۵۶۴ میلی‌متر است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به ترتیب زریک و ترمیک هستند (بنایی، ۱۳۷۷). خاک‌های این منطقه براساس مطالعات زارعیان و حسن‌شاهی (۱۳۸۳) در چهار رده انتی‌سول، اینسپتی‌سول، ورتی‌سول و آلفی‌سول طبقه‌بندی شدند (Soil Survey Staff, 2022).

نمونه‌برداری

پس از طراحی شبکه آماربرداری سامانمند با ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در نرم‌افزار ArcGIS و انتقال مختصات محل نمونه‌ها به دستگاه سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، موقعیت محل نمونه‌برداری‌های خاک در منطقه شناسایی شد و نمونه‌های خاک سطحی (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. در مجموع ۱۳۴ نمونه خاک شامل (۴۴ نمونه با کاربری مرتعی و ۹۰ نمونه با کاربری زراعی-باغی از منطقه برداشت شد (شکل ۱). شکل ۲ نقشه ارتفاعی و کاربری (برگرفته از نقشه سازمان جنگل‌ها و مراتع، سال ۱۳۸۶) منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، اندازه‌گیری شد. pH در گِل اشباع خاک و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گِل اشباع تعیین شدند (Rhoades, 1996). چگالی ظاهری خاک با روش استوانه‌های فلزی اندازه‌گیری شد (Blake and Hartge, 1986). کربن آلی با روش والکی-بلک (Nelson and Sommers,1982) تعیین شد. کربنات کلسیم معادل پس از تیمار نمونه‌ها با اسید کلریدریک و تیتراسیون توسط سود اندازه‌گیری شد (Nelson, 1982). ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات‌سدیم یک نرمال اندازه‌گیری شد (Chapman, 1965).



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در استان فارس و نقاط نمونه‌برداری‌شده



ب الف

شکل ۲. نقشه ارتفاعی (الف) و کاربری (ب) منطقه مطالعاتی دارنگان

تحلیل داده‌ها

به‌منظور 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 موردبررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی آزمون نرمال بودن داده‌ها، از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف استفاده شد. محاسبه و رسم نیم‌تغییرنماها برای مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک، اعمال مدل‌های زمین‌آماری و رسم نقشه‌های پهنه‌بندی این مشخصه‌ها و به‌طورکلی مطالعات زمین-آماری برای دستیابی به مناسب‌ترین مدل میان‌یابی از نظر دقت و صحت در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۷ انجام شد. آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ انجام و میانگین نتایج با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم مقایسه شدند. همبستگی بین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۶ انجام شد.

مطالعات زمین‌آماری

نمونه‌های انتخاب‌شده در زمین‌آمار از جامعه مستقل نبوده بلکه تا فاصله معینی به‌صورت مکانی نسبت به هم‌وابستگی 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 (Goovaerts, 1997). 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 موردبررسی است (Camberdella et al., 1994). رایج‌ترین واریوگرام‌های دارای سقف، واریوگرام‌های برازش شده با مدل‌های کروی و نمایی هستند. مهم‌ترین کاربرد واریوگرام، استفاده از اطلاعات آن در مدل‌های زمین‌آماری 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 به‌وسیله تابع زیر تخمین زده می‌شود (رابطه ۱).

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

که در آن :

γ، نیم‌تغییرنما؛ N(h)، شمار جفت نمونه‌های به‌کاررفته در محاسبات به ازای هر فاصله و برای تفکیک h؛ Z(x)، متغیر مشاهده شده؛ Z(x+h)، متغیر مشاهده‌شده به فاصله h از Z(x) است. تغییرنما برای یک جهت خاص با ترسیم مقادیر نیم‌تغییرنما در مقابل فاصله تفکیکی افزایش‌یافته و به حالت ایده‌آل در فاصله مشخصی ثابت می‌شود. با افزایش h، مقدار نیم‌تغییرنما تا فاصله معینی اضافه می‌شود و پس‌ازآن به حد ثابتی می‌رسد که حد آستانه نامیده می‌شود. 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=۰ اثر قطعه‌ای گفته می‌شود (Utset et al., 2000). معمولاً اثر قطعه‌ای ناشی از خطاهای نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و تجزیه داده‌ها است. مقادیر متغیر در نقاط فاقد آمار در کلیه روش‌های میانیابی زمین‌آماری از جمله کریجینگ با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Camberdella et al., 1994).

رابطه ۲)

$$Z^{*}(x_0)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i) \qquad with \qquad \sum_{i=1}^{n}\lambda_i=1$$

در این رابطه Z*(x0): مقدار تخمین زده‌شده متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات x0، Z(xi): مقدار مشاهده‌شده متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات xi، λi: وزن یا اهمیت نسبت داده‌شده به متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات xi و n: تعداد نقاط همسایگی است.

روش‌های مختلفی در برآورد متغیرهای مکانی وجود دارد که تفاوت 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[۱]، درصد خطای مطلق میانگین[۲] و میانگین مجذور خطای نرمال شده[۳] به منظور تعیین صحت مدل و مقایسه نتایج حاصل از تخمین‌گرهای مختلف و انتخاب بهترین مدل با استفاده از روابط زیر اقدام گردید (Gunarathna et al., 2016).

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

رابطه ۴) $MAPE= [\sum(Z^*(xi)-Z(xi)/(xi)) /n]*100$

رابطه ۵) $NRMSE= (RMSE\times100)/Z_{avg}$

در این روابط: Z*(Xi) مقدار برآورد شده، Z (Xi) مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر، Z_{avg} میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد نقاط است. اگر تخمین کاملا دقیق باشد، این شاخص‌ها باید به صفر برسند. بنابراین مقدار کمتر آنها (به‌جز ضریب تبیین) نشان‌دهنده دقت بیشتر روش میان‌یابی می‌باشد (Goovaerts, 2000). 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 NRMSEزیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق‌بودن مدل، ۲۰-۱۰درصد مناسب بودن مدل، ۳۰-۲۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است (Savage, 1993). 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 برگزیده‌شده بین متغیرهای مختلف استفاده گردید (جدول ۳). در نهایت، با استفاده از اطلاعات حاصل از محاسبات تغییرنما 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 اندازه‌گیری‌شده خاک در منطقه مورد مطالعه با دو روش میان‌یابی قطعی[۴] و زمین‌آماری انجام شد. در روش‌های قطعی یا معین، تنها از توابع ریاضی استفاده‌شده و مستقل از ارتباط مکانی بین مقادیر متغیرها می‌باشند. در این بررسی از روش‌های قطعی شامل چندجمله‌ای جهانی[۵]، میان‌یابی چندجمله‌ای محلی[۶]، وزن‌دهی فاصله معکوس[۷]، و تابع پایه شعاعی[۸] استفاده شد (Gunarathna et al., 2016).

در روش‌های میان‌یابی زمین‌آماری از توابع ریاضی و آمار استفاده‌شده و فرض بر این است که نمونه‌های انتخاب‌شده 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 فضایی داده‌های ورودی و تخمین مقدار مکان‌های اندازه‌گیری‌نشده استفاده می‌شود (Gunarathna et al., 2016). در این بررسی از روش‌های زمین‌آماری شامل کریجینگ، کوکریجینگ و کریجینگ تجربی بیزین[۹] استفاده شد (Wackernagel, 2003). به این مدل‌ها، مدل های ساختار مکانی نیز گفته می‌شود و متغیرهایی که با این گونه مدل‌ها بیان می‌شوند، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شوند (Goovaerts, 1997). از طرفی، برای هر سه روش زمین‌آماری اشاره شده در بالا، از سه نوع برآورد معمولی[۱۰]، ساده[۱۱] و جهانی[۱۲] استفاده شد. این در حالی است که

---

1 Mean Absolute Deviation (MAD)
۲ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)
3 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)
۴ Deterministic
۵ Global Polynomial Interpolation; GPI
۶ Local Polynomial Interpolation; LPI
۷ Inverse Distance Weight; IDW
۸ Radial Basis Function; RBF
۹ Empirical Bayesian kriging
۱۰ Simple prediction
۱۱ Ordinary prediction
۱۲ Universal prediction

هر کدام از این سه نوع برآورد دارای ۱۱ نوع مدل شامل مدل‌های دایره‌ای[۱]، کروی[۲]، تترا اسفریکال[۳]، پنتااسفریکال[۴]، نمایی[۵]، گوسین[۶]، رشنال کوادراتیک[۷]، اثر حفره[۸]، جی بیسل[۹]، کی بیسل[۱۰] و پایدار[۱۱] می‌باشد (Johnson et al., 2001). به عبارت دیگر در این مطالعه از ۱۰۴ مدل شامل ۵ مدل قطعی و ۹۹ مدل زمین‌آماری برای انتخاب مناسب‌ترین مدل با قوی‌ترین ساختار مکانی استفاده شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. ضریب کولموگروف-اسمیرنف در دامنه ۰/۰۵۰ برای ویژگی چگالی ظاهری تا ۰/۱۷۳ برای ویژگی پ‌هاش 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. خاک‌ها به‌طور میانگین، دارای بافت لوم رسی سیلتی بوده و ذرات سیلت جزء غالب (بیش از ۵۰ درصد) ذرات معدنی خاک را تشکیل می‌دهند. هدایت الکتریکی خاک‌های منطقه در دامنه ۰/۳ تا ۵/۱۲ دسی زیمنس بر متر بوده و محدودیت چندانی از نظر شوری در اغلب مناطق وجود نداشته‌است. میانگین کربنات کلسیم معادل خاک‌ها حدود ۴۰ درصد است که بیانگر آهکی بودن خاک‌ها و یکی از دلایل ایجاد محدودیت برای تغذیه گیاه است. کربن آلی خاک‌ها در دامنه ۰/۰۵ تا ۲/۷ درصد و میانگین پ‌هاش معادل ۷/۷۴، بیانگر شرایط قلیایی ضعیف در اکثر خاک‌های منطقه بوده است. میانگین چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل‌کاتیونی خاک‌ها به ترتیب ۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۱/۹ سانتی مول (بار) بر کیلوگرم شد.

جدول ۱. توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌ها در منطقه مطالعاتی

متغیر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار[۱]	ضریب تغییرات[۲]	چولگی[۳]	کشیدگی[۴]	ضریب کولموگروف-اسمیرنوف
شن	%	۰/۶	۴۸/۴	۱۹/۸	۱۰/۶	۵۳/۵	۰/۳۹	-۰/۱۹	۰/۰۷۰
سیلت	%	۳۴/۲	۶۸/۴	۵۰/۹	۷/۳۶	۱۴/۴	-۰/۰۴	-۰/۲۵	۰/۰۷۱
رس	%	۱۱/۶	۴۷/۰	۲۹/۳	۷/۷	۲۶/۳	-۰/۰۳	-۰/۶۳	۰/۰۸۴
قابلیت هدایت الکتریکی	dSm^{-1}	۰/۳	۵/۱۲	۱/۶۴	۱/۱۱	۶۷/۲	۰/۹۵	-۰/۰۲	۰/۱۷۲
کربنات کلسیم معادل	%	۲۰/۵	۶۳/۵	۳۹/۶	۸/۳۴	۲۱/۱	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۰۵۴
کربن آلی	%	۰/۰۵	۲/۷۲	۰/۸۷	۰/۳۸	۴۴/۰	۱/۹۰	۶/۷۲	۰/۱۱۲
پ‌هاش	-	۷/۲	۸/۱	۷/۷۴	۰/۲۰	۲/۶۳	-۰/۵۹	-۰/۴۷	۰/۱۷۳
چگالی ظاهری	gcm^{-3}	۱/۰۲	۱/۷۹	۱/۳۸	۰/۱۵	۱۱/۰	۰/۲۶	-۰/۲۷	۰/۰۵۰
ظرفیت تبادل کاتیونی	$Cmolkg^{-1}$	۶/۱۸	۱۷/۷	۱۱/۹	۲/۷۹	۲۳/۳	۰/۰۲	-۰/۸۱	۰/۰۵۵

[1]SD: Standard deviation, [2]CV: Coefficient of variation, [3]Skew: Skewness, [4]Kurtosis

در بین متغیرهای موردمطالعه، پ‌هاش دارای کمترین ضریب تغییرات (۲/۶۳ درصد) و قابلیت هدایت الکتریکی دارای بیشترین ضریب تغییرات (۶۷/۲ درصد) بوده‌است (جدول ۱). احمدی‌وند و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه خود با عنوان اثر کاربری بر توزیع مکانی ویژگی‌های خاک در منطقه کرمان، pH و قابلیت هدایت الکتریکی را به ترتیب دارای کمترین و بیشترین ضریب تغییرات در بین متغیرهای مطالعه‌شده منطقه موردمطالعه اعلام نمودند که نتایج این مطالعه با آن همخوانی داشته است. تغییرپذیری زیاد قابلیت هدایت الکتریکی، در

---

۱ Circular
۲ Spherical
۳ Tetraspherical
۴ Pentaspherical
۵ Exponential
۶ Gaussian
۷ Rational Quadratic
۸ Hole Effect
۹ J-Bessel
۱۰ k-Bessel
۱۱ Stable

نتیجه تغییرات رطوبتی و حرارتی، نوع کاربری و مواد مادری بوده و از دلایل بالا بودن ضریب تغییرات این ویژگی بیان‌شده است.

به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در منطقه موردمطالعه، میزان ضریب همبستگی بین زوج پارامترها محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. از بین این ویژگی‌ها، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد با سایر ویژگی‌ها بوده‌اند. متغیرهایی که دارای سطوح همبستگی بالایی هستند، بهترین انتخاب برای کمک به برآورد بهتر ویژگی‌های موردمطالعه توسط روش‌های مختلف زمین‌آماری می‌باشند.

جدول ۲. ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های موردنظر در منطقه مطالعاتی دارنگان

	شن	سیلت	رس	قابلیت هدایت الکتریکی	کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	پ‌هاش	چگالی ظاهری	ظرفیت تبادل کاتیونی
شن	۱	۰/۸۹۱**	-۰/۹۰**	۰/۲۹**	۰/۳۲۱**	-۰/۳۹**	-۰/۱۴۸	۰/۶۱**	-۰/۵۵**
سیلت		۱	۰/۶۰**	-۰/۲۷**	۰/۲۰۱*	۰/۲۵**	۰/۰۸۲	۰/۱۱۵	۰/۳۶**
رس			۱	۰/۲۰۰*	۰/۵۸۱**	-۰/۲۳**	-۰/۱۷۸	-۰/۶۵۱**	۰/۹۶۲**
قابلیت هدایت الکتریکی				۱	-۰/۱۳۸	۰/۳۱۴**	-۰/۸۲۰**	-۰/۳۶۰**	۰/۲۷۹**
کربنات کلسیم معادل					۱	-۰/۲۶۷**	۰/۲۰۲*	۰/۵۷۳**	-۰/۶۰۹**
کربن آلی						۱	-۰/۳۹۱**	-۰/۴۰۲**	۰/۲۵۱**
پ‌هاش							۱	۰/۳۹۰**	-۰/۲۷۹**
چگالی ظاهری								۱	-۰/۷۴۰**
ظرفیت تبادل کاتیونی									۱

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطوح ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهد.

در پژوهش صورت گرفته در خاک‌های استان اصفهان، پیرامون توزیع مکانی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌غیر از پ‌هاش 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 (مشایخی و مرجوی، ۱۴۰۲). 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. بااین‌حال در مورد مشخصه‌هایی شامل شن، رس، چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش تجربی با اضافه‌کردن 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 مطالعه شده خاک را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، با در نظر گرفتن آماره‌های مورد استفاده، بهترین مدل ساختار مکانی با بالاترین دقت، برای متغیرهای شن، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، پ‌هاش و چگالی ظاهری، مدل نمایی، برای سیلت مدل منطقی درجه دوم و برای رس، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی، مدل کروی بود. ساختار مکانی برای کربنات کلسیم معادل ضعیف، برای کربن آلی متوسط و برای سایر متغیرها قوی به‌دست آمد.

ضریب تبیین بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در دامنه ۰/۵۶ (برای کربن آلی) تا ۰/۹۹ (برای سیلت و رس) بدست آمده است. میانگین مجذور خطای نرمال‌شده نیز در دامنه ۱/۲ برای رس و چگالی ظاهری تا ۲۳/۸ برای کربن آلی محاسبه شد (جدول ۳). ضریب تبیین بالایی (r=-۰,۹۱) بین این دو شاخص خطا بدست آمد. همانگونه که قبلا ذکر شد که مقادیر NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق‌بودن 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 ویژگی‌های شن، سیلت، رس، چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای مدل دقیق، ویژگی‌های قابلیت هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم معادل دارای مدل مناسب و ویژگی کربن آلی دارای مدلی با دقت متوسط بوده است.

در مطالعه‌ای مروری که پیرامون نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌های خاک موجود درنقشه‌های جهانی خاک در مقیاسی بزرگ انجام گرفت، ازبین ویژگی‌های خاک پ‌هاش (با r^2=۰/۶) بهترین ویژگی پیش‌بینی‌شده بوده‌است. پس از آن ویژگی‌های رس، سیلت، شن، کربن آلی و چگالی ظاهری بودند. مقادیر قطعات درشت و عمق خاک پائین‌ترین درجه پیش‌بینی را داشته‌اند (r^2=۰/۲۸) (Chen et al., 2022). حبشی و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهشی در گرگان نشان دادند که تغییرنمای مناسب برای متغیرهای پ‌هاش و کربن آلی خاک، مدل کروی بوده است. Xing-Yi et al. (2007) در پژوهش انجام گرفته در کشور چین در ارتباط با تغییرات مکانی ویژگی‌های انتخابی خاک با استفاده

زمین‌آمار به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ به‌طور موفقیت‌آمیزی توانسته متغیرها را با دقت زیاد درون‌یابی کند. در پژوهش دیگری مرتبط با پراکنش مقدار کربن آلی در خاک‌های شمال شرق چین ثابت شد که روش کریجینگ معمولی می‌تواند توزیع مکانی کربن آلی خاک را به‌دقت برآورد کند (Wu et al., 2008).

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

متغیر	مدل واریوگرام	متغیر کمکی	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنه تأثیر (متر)	نسبت اثر قطعه‌ای به سقف (درصد)	کلاس وابستگی مکانی	میانگین مجذور خطای نرمال‌شده (٪)	میانه انحراف قدر مطلق	درصد خطای مطلق میانگین	ضریب تبیین
شن	کوکریجینگ معمولی– نمایی	رس و چگالی ظاهری	۰/۰۰۰	۱/۱۰۰	۲۷۳۳	۰	قوی	۷/۷	۱/۲۳۱	۲۶/۸۰	۰/۹۴
سیلت	کوکریجینگ معمولی– منطقی	شن و رس	۰/۰۴۹۹	۴۹/۹۴۸	۲۰۰۰	۰/۰۹۹	قوی	۱/۴	۰/۵۸۴	۱۱/۶۸	۰/۹۹
رس	کوکریجینگ معمولی– کروی	ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی	۰	۶۰/۸۳	۲۰۰۴	۰	قوی	۱/۲	۰/۳۲۰	۱/۲۴۰	۰/۹۹
هدایت الکتریکی	کریجینگ معمولی نمایی	–	۰/۰۶۹۸	۱/۶۷۲	۱۰۵۵۳	۴/۱۷	قوی	۱۹/۱	۰/۳۷۳	۳۲/۲۷	۰/۶۷
کربنات کلسیم معادل	کوکریجینگ ساده، نمایی	تبادل کاتیونی و کربن آلی	۰/۶۶۷۲	۰/۳۸۰	۲۲۹۰	۱۷۵/۵	ضعیف	۱۴/۵	۴/۶۰۳	۱۲/۵۶۷	۰/۶۱
کربن آلی	کوکریجینگ کروی	ظرفیت تبادل کاتیونی، شن	۰/۳۰۰۷	۰/۷۲۶	۲۵۸۴	۴۱/۴۱	متوسط	۲۳/۸	۰/۱۷۹	۱۰/۷۸۸	۰/۵۶
pH	کوکریجینگ ساده، نمایی	سیلت و هدایت الکتریکی	۰/۰۰۰۰۷۵	۰/۰۴۳	۳۴۴۸	۰/۱۷۴	قوی	۱/۳	۰/۰۸۷	۱/۱۴۱۱	۰/۸۳
چگالی ظاهری	کوکریجینگ معمولی،نمایی	شن، سیلت و رس	۰	۰/۰۲۴۱	۲۳۶۱	۰	قوی	۱/۲	۰/۰۱۴	۱/۰۴۴۳	۰/۹۲
ظرفیت تبادل کاتیونی	کوکریجینگ معمولی،کروی	کربن آلی، کربنات کلسیم	۰	۷/۹۴۶	۲۰۰۴	۰	قوی	۱/۴	۰/۱۰۵	۰/۹۷۸	۰/۹۷

شعبانی (۱۳۸۷) در مطالعه مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات پ‌هاش و TDS آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان، گزارش کرد که روش کریجینگ ساده و کریجینگ 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 خطا پایین‌تر، روش‌های مناسبی در تهیه نقشه پهنه‌بندی این دو مشخصه در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. دانش و همکاران (۲۰۲۲) تغییرپذیری مکانی ماده آلی خاک، تحت تأثیر نوع کاربری اراضی را با روش‌های درون‌یابی و شبکه عصبی تخمین زدند. با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع، روش‌ها مقایسه شدند و بهترین برازش بر اساس میانگین خطا و ریشه میانگین مربع خطا انتخاب شدند. بهترین مدل‌های نیم‌تغییرنماهای برازش داده‌شده کروی بودند. روش اعتبارسنجی متقابل، شبکه عصبی مصنوعی را به‌عنوان دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی ماده آلی خاک نشان داد.

کم‌ترین اثر قطعه‌ای مربوط به درصد شن، رس، چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی (با مقدار صفر) 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 غیرقابل‌پیش‌بینی است (بهنام و همکاران، ۱۳۹۸). بیشترین اثر قطعه‌ای در کربنات کلسیم معادل (۰/۶۶۷۲)، کربن آلی (۰/۳۰۰۷) و قابلیت هدایت الکتریکی (۰/۰۶۹۸) مشاهده شد (جدول ۳). 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 (Webster and Oliver, 2007).

Zhang et al. (2009) بیان نمودند که وابستگی مکانی قوی ممکن است ناشی از تغییرات ذاتی خاک و وابستگی مکانی ضعیف‌تر به دلیل تغییرات غیر ذاتی 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. همبستگی مکانی همچنین، به میزان زیادی به مقیاس مطالعه بستگی دارد. به عنوان‌مثال ویژگی‌هایی که وابستگی مکانی متوسطی دارند این امکان را دارند که در مقیاس‌های کوچک‌تر از مقیاسِ به‌کاررفته، وابستگی مکانی قوی‌تری نشان دهند (فروغی‌فر و همکاران، ۱۳۹۰).

ویژگی‌های سیلت، رس و ظرفیت تبادل کاتیونی در بین ویژگی‌های موردمطالعه دارای کمترین دامنه تأثیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ متر) و قابلیت هدایت الکتریکی بیشترین دامنه تأثیر (۱۰۵۵۳ متر) را داشته است (جدول ۳). دامنه تأثیر ویژگی‌های خاک، وابسته به مقیاس موردمطالعه و فاصله نقاط نمونه‌برداری دارد. بیشتر بودن دامنه تأثیر، نشان‌دهنده تغییر و ناهمگونی کمتر آن ویژگی در منطقه مطالعاتی است (فروغی‌فر و همکاران، ۱۳۹۰). بر این اساس دامنه تأثیر زیادِ قابلیت هدایت الکتریکی، نشان‌دهنده پایداری این ویژگی در خاک‌های موردمطالعه است. در مقابل بافت و ظرفیت تبادل کاتیونی (که خود تا حدود زیادی متأثر از بافت است)، بیشترین میزان تغییرات در سطح منطقه را نشان داده‌اند. به طور کلی دامنه تاثیر، 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 موردنظر را مشخص ساخته و اطلاعاتی در رابطه با حد مجاز فاصله نمونه‌برداری را ارایه می‌کند. در مطالعه‌ای، به‌منظور تعیین پراکنش ویژگی‌های خاک در کرج، وابستگی مکانی ضعیف، متوسط و قوی به ترتیب برای رس، شن و سیلت گزارش شد (زارعیان و همکاران، ۱۳۹۳). 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، پ‌هاش 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 (Bijanzadeh et al., 2014).

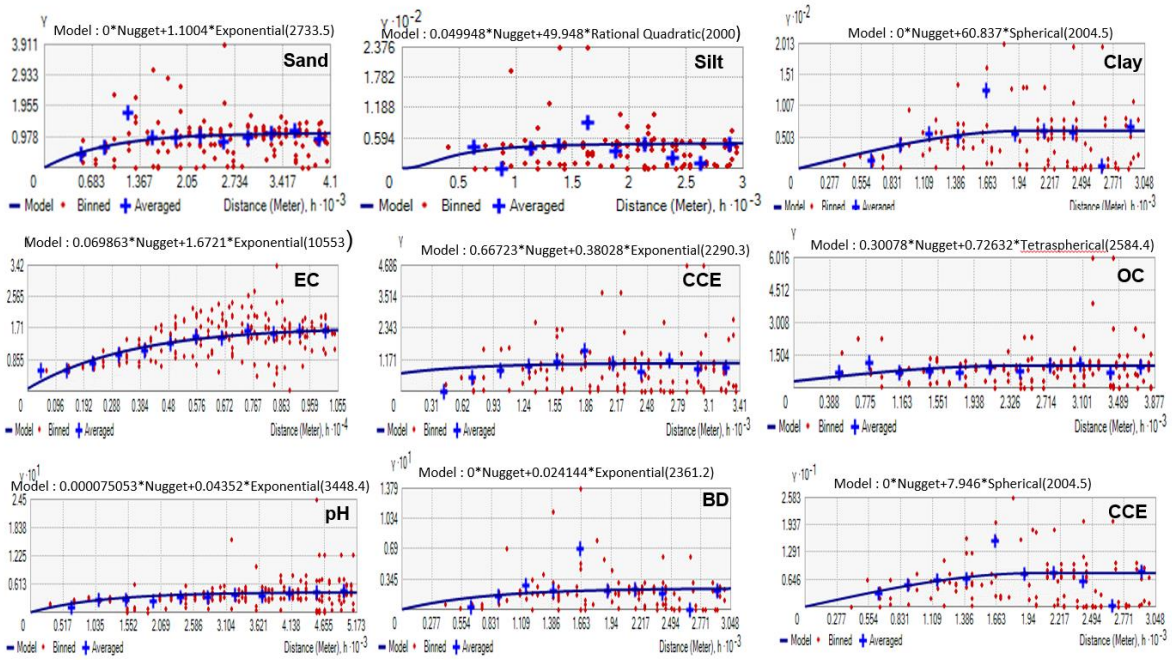
در مطالعه زمین‌آماری برخی ویژگی‌های خاک در اراضی جنگلی تحت فرسایش در استان کهگیلویه و بویراحمد، نصیری و همکاران (۱۳۹۸) کلاس همبستگی مکانی قوی برای ویژگی‌های موردمطالعه گزارش نمودند و آن‌را گواهی بر الگوی پیوسته تغییرات مکانی آن ویژگی‌ها و کارایی فاصله نمونه‌برداری در انعکاس تغییرات مکانی متغیرهای موردبررسی گزارش نمودند. توزیع مکانی چهارده ویژگی فیزیکوشیمیایی خاک در یک مزرعه گندم در استان گلستان ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توزیع مکانی و سطح وابستگی مکانی در منطقه متفاوت بوده است. از میان ویژگی‌های مطالعه شده نیترات کمترین (۲۴ متر) و پتاسیم (۹۴ متر) بیشترین دامنه وابستگی مکانی را داشت. پارامترهای pH، EC، شن، سیلت، رس، فسفر، کربنات کلسیم و ماده آلی دارای دامنه وابستگی مکانی متوسط بودند (Ayoubi et al., 2007).

تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک باغ‌های میوه در منطقه کشمیر هندوستان با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ کلاسیک و معمولی موردبررسی قرار گرفت. پارامترهای نیم‌تغییرنما نشان داد که تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک به‌صورت متقابل منحصر به فرد است. توزیع مکانی ویژگی‌های خاک با کریجینگ معمولی بر اساس مقادیر میانگین مربعات خطا برای ویژگی‌های پ‌هاش، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم با مدل کروی، برای قابلیت هدایت الکتریکی و کربن آلی با مدل نمایی و برای منیزیم با مدل گوسی ترسیم‌شد. میزان وابستگی مکانی حاصل از تحلیل نیم‌تغییرنماها، نشان‌دهنده وابستگی قوی (۱۷/۶ درصد) تا متوسط (۷۴/۲ درصد) ویژگی‌های مطالعه شده بود (Bangroo et al., 2021).

توزیع فضایی و تغییرپذیری مکانی بافت خاک در مطالعه‌ای به روش زمین‌آماری مطالعه شد. پهنه‌بندی بافت خاک به کمک پیش‌بینی کوکریجینگ از سه جزء معدنی خاک انجام شد. برازش مدل‌های تئوریکی نشان داد که بهترین مدل نیم تغییرنما برای رس، سیلت و شن به ترتیب کروی، کروی، نمایی می‌باشد، همچنین بیشترین خطای تخمین مربوط به شن و کمترین خطای تخمین مربوط به رس بوده است. همچنین نتایج نقشه کوکریجینگ بافت خاک، با بافت‌های خاک تعیین‌شده در آزمایشگاه به میزان ۷۰ درصد همخوانی داشته است (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۷). طاعتی و همکاران (۱۳۹۹) به پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار در بخشی از اراضی دشت قزوین پرداختند. نتایج آنان نشان داد که بهترین مدل برای بررسی ویژگی‌های پ‌هاش و سیلت در هر دو عمق، مدل نمائی و برای قابلیت هدایت الکتریکی، رس و سیلت مدل گوسی است. کلاس وابستگی مکانی نیز برای ویژگی‌های مطالعه شده متوسط تا قوی ارزیابی شد.

شکل ۳ نیم تغییرنماهای برازش شده برای مناسب‌ترین مدل‌های ذکر شده در جدول ۳ برای پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری

شده خاک در منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. آنچه از نتایج این بررسی برمی‌آیند حکایت از برتری مدل‌های زمین‌آماری 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 صرفا برای شبکه آماربرداری ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در منطقه موردمطالعه اعتبار دارد.



شکل ۳. نیم تغییرنماهای ویژگی‌های خاک در منطقه موردمطالعه

مقایسه بین نمودار نیمه متغیرنماها، نمودار برازش مدل ارزیابی دقت (میانگین مجذور خطای نرمال‌شده) برای مشخصه‌هایی که دارای ساختار مکانی ضعیف (کربنات کلسیم معادل) و متوسط (کربن آلی) 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 به‌طورکلی 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 قابل‌قبول برای ابعاد شبکه آماربرداری در نظر گرفت؛ چرا که با توجه به شکل ۳، در این فاصله تغییرات نیمه متغیرنما ثابت‌شده و با افزایش بیشتر فاصله، تغییری در اختلاف داده‌ها ایجاد نمی‌شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۸). به عبارت دیگر هر چه فاصله نمونه‌برداری‌ها از دامنه تاثیر کمتر باشد شباهت داده‌ها به هم بیشتر است. این موضوع می‌تواند راهنمایی برای تنظیم شبکه آماربرداری برای نمونه‌برداری مشخصه‌های موردنظر خاک در منطقه بر اساس هدف از پیش تعیین‌شده 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.

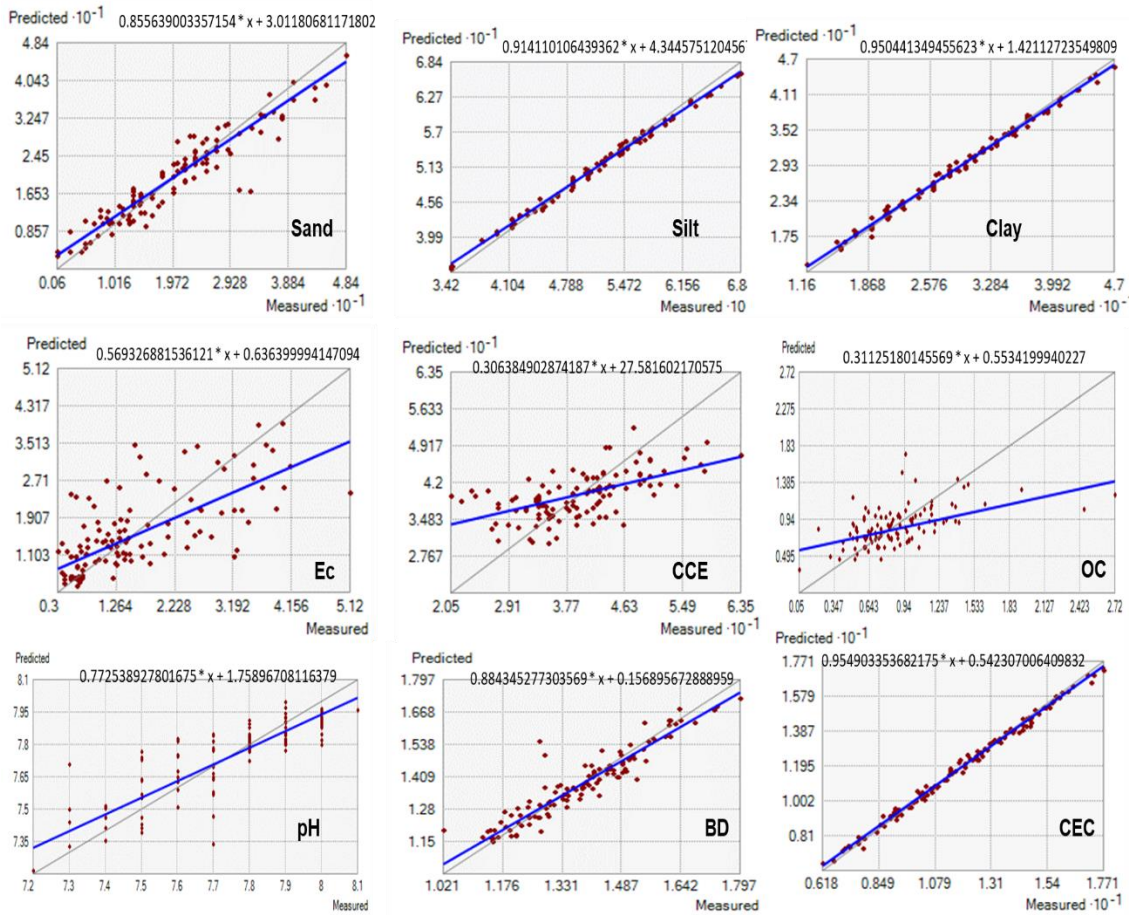
در این مطالعه با آزمون مدل‌های زمین‌آماری و قطعی برای هر یک از مشخصه‌های مورد اشاره خاک در نرم‌افزار، مناسب‌ترین مدل با بالاترین دقت و صحت و پایین‌ترین میزان میانگین مجذور خطا بر نیم‌تغییرنمای طراحی شده بر روی داده‌های آن مشخصه برازش گردید. از طرفی در هر سری تحلیل داده برای هر یک از مشخصه‌های مورد نظر چنانکه در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، بسیاری از پیش‌فرض‌های نرم افزار برای انجام تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این موضوع برای نرم‌افزارهای مشابه در دسترس نیز صادق می‌باشد

که باعث بالارفتن 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.

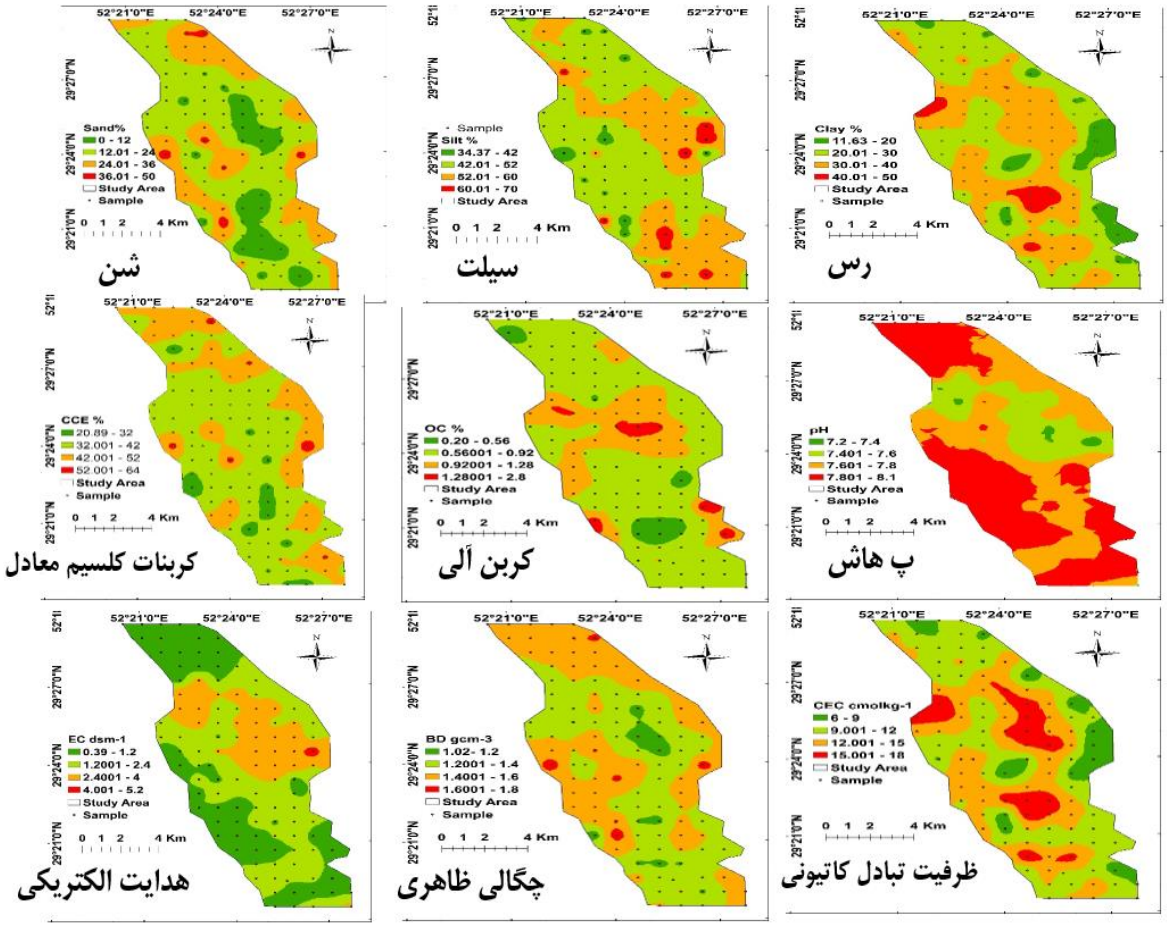
شکل ۵، نقشه پراکنش و در اصل پهنه‌بندی ویژگی‌های موردمطالعه بر اساس بهترین روش درون‌یابی آن‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه‌ها، حداکثر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در مناطق مرکزی منطقه مطالعاتی بوده و با دور شدن از مرکز مقدار این ویژگی، کاهش پیدا کرده است. جنس مواد مادری، شرایط پستی و بلندی، مقدار ماده آلی، وضعیت زهکشی خاک و نوع کاربری از جمله عوامل اثرگذار بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌باشد که در منطقه مورد مطالعه با درجاتی تاثیرگذار می‌باشند. همچنین بیشترین مقدار پ‌هاش در بخش جنوب غربی منطقه مطالعاتی مشاهده‌شده‌است. توزیع کربن آلی در منطقه به گونه‌ای است که بیشترین مقدار در مرکز و دو بخش در جنوب غرب و جنوب شرق منطقه مشاهده‌شده است.

بیشترین مقادیر کربنات کلسیم معادل در بخش شرقی منطقه و مجاور با شیب تپه‌ها، جایی که واریزه‌های آهکی کوه سبزپوشان وجود دارد (شکل ۱ و ۵). در این بخش، خاک دارای شن بیشتر و رس کمتر بوده است. بخش مرکزی دشت با شیب کمتر دارای بافت سنگین‌تر و ماده آلی بیشتر بوده و ازاین‌رو ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز بیشتر بوده است. مناطقی که دارای کاربری زراعی–باغی بوده‌اند، دارای کربن آلی، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی بیشتر و پ‌هاش کمتر هستند. در مجموع به نظر می‌رسد ویژگی‌های مطالعه شده بیشتر تحت تأثیر عواملی چون شرایط پستی‌وبلندی منطقه، جنس مواد مادری و کاربری ارضی بوده است.

در مطالعه اثر کاربری بر تغییر ویژگی‌های خاک منطقه جیرفت، نتایج نشان داد که نوع کاربری به تغییر ویژگی‌های موردمطالعه منجر شده است. بیشترین مقدار رس در کاربری بوته‌زار مشاهده‌شده‌است. مقدار هدایت الکتریکی و کربن آلی در کاربری اراضی رهاشده به ترتیب حدود دو برابر بیشتر و حدود بیست درصد کمتر از اراضی زراعی بوده است (احمدی‌وند و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ٤. مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده ویژگی‌های خاک



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی حاصل از مدل انتخاب‌شده با کمترین خطا و بیشترین ضریب تبیین برای ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک با توجه به داده‌های جدول ۳

جدول ٤. مساحت و درصد سطوح چهارگانه ویژگی‌های مطالعه شده بر اساس نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵)

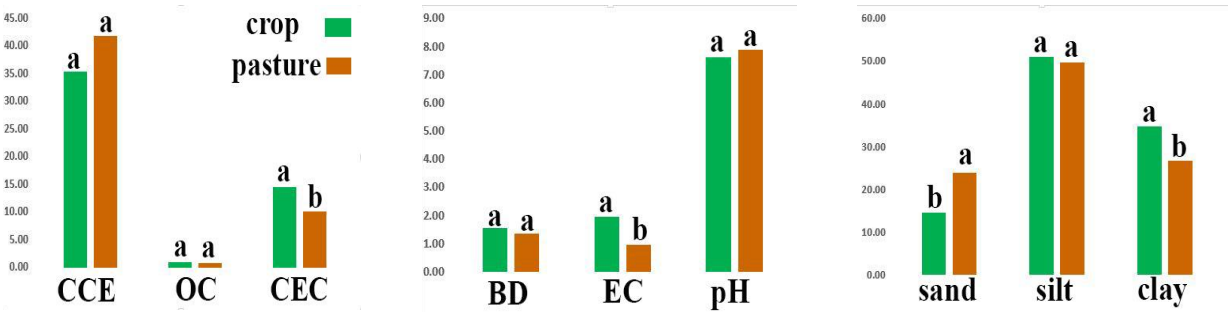
ویژگی	سطح اول		سطح دوم		سطح سوم		سطح چهارم	
	مساحت (ha)	درصد	مساحت (ha)	درصد	مساحت (ha)	درصد	مساحت (ha)	درصد
شن	۲۳۰۰	۱۱/۵	۱۴۱۶۰	۷۰/۸	۳۸۰۰	۱۵/۴	۴۶۰	۲/۳
سیلت	۶۸۰	۳/۴	۱۰۷۴۰	۵۳/۷	۷۸۲۰	۳۹/۱	۷۶۰	۳/۸
رس	۲۱۴۰	۱۰/۷	۱۱۴۶۰	۵۷/۳	۵۴۲۰	۲۷/۱	۹۸۰	۴/۹
پ‌هاش	۶۸۰	۳/۴	۲۹۴۰	۱۴/۷	۷۸۴۰	۳۹/۲	۸۵۴۰	۴۲/۷
قابلیت هدایت الکتریکی	۷۵۲۰	۳۷/۶	۷۹۲۰	۳۹/۶	۴۳۲۰	۲۱/۶	۲۴۰	۱/۲
چگالی ظاهری	۱۳۴۰	۶/۷	۱۰۱۶۰	۵۰/۴	۸۲۲۰	۴۱/۱	۳۶۰	۱/۸
کربنات کلسیم	۱۱۶۰	۵/۸	۱۴۷۶۰	۷۳/۸	۳۷۴۰	۱۸/۷	۳۴۰	۱/۷
کربن آلی	۱۱۲۰	۵/۶	۱۳۸۲۰	۶۹/۱	۴۱۲۰	۲۰/۶	۹۴۰	۴/۷
ظرفیت تبادل کاتیونی	۱۶۶۰	۸/۳	۸۸۲۰	۴۴/۱	۷۷۴۰	۳۸/۷	۱۷۸۰	۸/۹

جدول ۴ مساحت و درصد سطوح چهارگانه ویژگی‌های مطالعه شده بر اساس نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های این جدول حدود ۸۲ درصد وسعت منطقه دارای پ‌هاش ۷/۶ تا ۸/۱، حدود ۹۰ درصد منطقه دارای کربن آلی به میزان ۰/۵۶ تا ۱/۲۸ درصد و ۹۸/۸ درصد منطقه قابلیت هدایت الکتریکی کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر داشته است. همچنین مقدار رس در ۸۴ درصد منطقه در دامنه ۲۰ تا ۴۰ درصد و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی در ۸۳ درصد منطقه در دامنه ۹ تا ۱۸ سانتی‌مول بر کیلوگرم بوده است. مقدار کربنات کلسیم معادل نیز در ۹۱ درصد منطقه در دامنه ۳۲ تا ۵۲ درصد بوده است. با توجه به پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک، به نظر

می‌رسد ویژگی‌های محدود کننده شامل سیلتی‌بودن زیاد بافت خاک (۹۳ درصد منطقه دارای ۴۲ تا ۶۰ درصد سیلت می‌باشد) که موجب افزایش استعداد فرسایش‌پذیری به ویژه در اراضی شیب‌دار با پوشش گیاهی ضعیف می‌شود. همچنین درصد نسبتاً بالای کربنات کلسیم تا حدودی موجب افزایش پ‌هاش و کاهش قابلیت فراهمی عناصر ریزمغذی می‌شود. کربن آلی خاک‌های منطقه به عاملی مهم در کیفیت خاک، نیز نسبتاً کم بوده (میانگین ۰/۸۷ درصد) که موجب کاهش پایداری خاک‌دانه و همچنین کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی می‌شود.

نتایج مقایسه آماری ویژگی‌های مطالعه شده در کاربری‌ها (زراعی-باغی و مرتعی) نشان می‌دهد که مقادیر شن، رس، قابلیت هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد هستند (شکل ۶). بیشترین اختلاف به ترتیب مربوط به مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی، شن، ظرفیت تبادل کاتیونی و رس بوده است. پژوهش‌های زیادی پیرامون اثر نوع کاربری بر تغییر ویژگی‌های خاک انجام گرفته است. در مطالعه انجام گرفته در منطقه یاسوج، 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 گزارش شدند (اولیایی و همکاران، ۱۴۰۲). در پژوهشی دیگر، تغییر کاربری اراضی از جنگل به اراضی زراعی کم بازده، موجب کاهش مقادیر ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، قابلیت هدایت الکتریکی و افزایش مقادیر چگالی ظاهری، شن و پ‌هاش شده است (نصیری و همکاران، ۱۳۹۸).

به دنبال تغییر کاربری اراضی جنگلی به زراعی در مناطق مختار و سروک استان کهگیلویه و بویراحمد، مقادیر چگالی ظاهری و سیلت در کاربری زراعی افزایش، مقادیر کربنات کلسیم معادل، کربن آلی کاهش و مقادیر شن و رس تفاوت معنی‌داری نشان ندادند (مهمان‌دوست و همکاران، ۱۳۹۷). جلالی و همکاران (۱۳۹۰) معتقدند که در اراضی کشاورزی تحت کشت، تأثیر فرایندهای مدیریتی مانند کوددهی، شخم زدن، ابیاری و غیره را باید در نظر داشت؛ چراکه این فرایندها به‌مرور می‌توانند همبستگی مکانی متغیرهای خاک را تحت تأثیر قرار دهند.



شکل ٦. تاثیر کاربری اراضی بر ویژگی‌های مطالعه شده (حروف متفاوت اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد را نشان می‌دهد).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در بین متغیرهای موردمطالعه، به ترتیب پ‌هاش و قابلیت هدایت الکتریکی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین ضریب تغییرات (۲/۶۳ درصد و ۶۷/۲ درصد) بوده‌اند. از بین ویژگی‌های مطالعه شده، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی دارای سطوح مختلفی از همبستگی معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد با سایر ویژگی‌ها بوده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بهترین مدل ساختار مکانی با بالاترین دقت، برای متغیرهای شن، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، پ‌هاش و چگالی ظاهری، مدل نمایی، برای سیلت، مدل منطقی درجه دوم و برای رس، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی، مدل کروی بوده است. ساختار مکانی برای کربنات کلسیم معادل ضعیف، برای کربن آلی متوسط و برای سایر متغیرها قوی بدست آمد. همچنین کم‌ترین اثر قطعه‌ای مربوط به شن، رس، چگالی ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی (با مقدار صفر) و بیشترین اثر قطعه‌ای مربوط به مقادیر کربنات کلسیم معادل (۰/۶۶۷۲)، کربن آلی (۰/۳۰۰۷) و قابلیت هدایت الکتریکی (۰/۰۶۹۸) بود. از بین ویژگی‌های موردمطالعه، ویژگی‌های سیلت، رس و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای کمترین دامنه تأثیر (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ متر) و قابلیت هدایت الکتریکی بیشترین دامنه تاثیر (۱۰۵۵۳ متر) را داشته است که نشان‌دهنده پایداری این ویژگی در خاک‌های مورد مطالعه است. در مقابل بافت و ظرفیت تبادل کاتیونی، بیشترین میزان تغییرات در سطح منطقه را نشان داده‌اند. مطالعه نیم تغییرنماهای برازش شده برای مناسب‌ترین مدل‌های انتخاب شده برای پهنه‌بندی مشخصه‌های اندازه‌گیری شده خاک در منطقه، نشان از برتری مدل‌های زمین‌آماری بر مدل‌های قطعی آزمون‌شده در مورد ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده خاک دارد. نمودار نیم‌تغییرنماهای مربوط به متغیرهای با ساختار مکانی ضعیف و متوسط، اثر قطعه‌ای بزرگتر نسبت به نمودار نیم‌تغییرنمای مربوط به گروه با

ساختار مکانی نشان داد. بر اساس نقشه پراکنش و پهنه‌بندی ویژگی‌های موردمطالعه، مناطقی که دارای کاربری زراعی-باغی بوده‌اند، دارای کربن آلی، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر و پ‌هاش کمتر بوده‌اند. در مجموع به نظر می‌رسد ویژگی‌های مطالعه شده به‌طور عمده تحت تأثیر عواملی چون شرایط پستی‌وبلندی منطقه، جنس مواد مادری و کاربری ارضی بوده‌اند. با توجه به تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و همچنین متفاوت بودن دامنه تأثیر این ویژگی‌ها در مطالعات آینده در این منطقه و مناطق مشابه پیشنهاد می‌شود که فواصل نقاط نمونه‌برداری خاک بر مبنای دامنه تاثیر ویژگی مورد نظر صورت پذیرد. در نهایت با توجه به نتایج بدست‌آمده مشخص شد که مدل‌سازی زمین‌آماری به‌خوبی می‌تواند عمده تغییرات پیوسته ویژگی‌های خاک را نشان‌دهد. با توجه به پژوهش‌های صحرائی مشخص شد که تغییرات کیفی و کمی خاک در ارتباط با نوع مواد مادری، پستی‌وبلندی و کاربری اراضی بوده که این عوامل می‌توانند شاخص‌هائی بهینه برای طراحی شبکه‌های نمونه‌برداری و شناسایی نواحی مدیریتی در کشاورزی دقیق و نیز برای صرفه‌جویی در مصرف نهاده‌های کشاورزی و حفظ محیط-زیست باشد. استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، یادگیری ماشین، جنگل‌های تصادفی و غیره به منظور مقایسه عملکرد مدل‌ها در برآورد مقدار ویژگی‌های خاک توصیه می‌شوند. همچنین توصیه می‌شود که نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از این پژوهش در زمان اختصاص بخش‌های مختلف اراضی به کاربری‌های معین و طراحی سامانه‌های مدیریت کشاورزی موردتوجه قرار گیرند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

احمدی، عباس؛ ترنج زر، حمید و کاظمی آزاده (۱۳۹۸). پهنه‌بندی شوری خاک سطحی در اراضی شور بولاق ساوه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۹، ۱۹-۱.

احمدی‌وند، مسلم؛ زمانی باب‌گهری، جواد؛ شکفته، حسین و عباس‌زاده افشار، فریده (۱۴۰۲). تأثیر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*. ۱۳ (۲) ، ۲۱۰-۲۳۴.

اسدزاده، فرخ؛ خسروی اقدم، کمال؛ یغمائیان مهابادی، نفیسه و رمضانپور، حسن (۱۳۹۷). تغییرات مکانی ذرات معدنی خاک با استفاده از زمین‌آمار و سنجش‌ازدور جهت پهنه‌بندی بافت خاک. *نشریه آب‌وخاک*، ۳۲، ۱۲۲۲-۱۲۰۷.

اولیایی، حمیدرضا؛ ادهمی، ابراهیم و نجفی قیری، مهدی (۱۴۰۱). تغییر شاخص‌های مغناطیسی و اکسیدهای آهن خاک در پی تغییر کاربری (مطالعه موردی: دشت مختار استان کهگیلویه و بویراحمد). *نشریه آب‌وخاک* ، ۸۲، ۲۸۲-۲۶۷.

بهنام، ولی؛ غلامعلی‌زاده آهنگر، احمد؛ رحمانیان، محمد و بامری، ابوالفضل (۱۳۹۸). بررسی توزیع مکانی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های زمین آمار (مطالعه موردی: مسیر زابل به زاهدان). *مجله محیط زیست و مهندسی آب*، ۵، ۲۶۳-۲۵۱.

جلالی، قباد؛ طهرانی، محمدمهدی ؛ برومند، ناصر و سنجری، صالح (۱۳۹۲). مقایسه روش‌های زمین‌آمار در تهیه نقشه پراکنش مکانی برخی عناصرغذایی در شرق استان مازندران. *مجله پژوهش‌های خاک*، ۲۷، ۲۰۴-۱۹۵.

حبشی، هاشم؛ حسینی، سیدمحسن؛ محمدی، جهانگرد و رحمانی، رامین (۱۳۸۶). کاربرد تکنیک زمین‌آمار در مطالعات خاک‌های مناطق جنگلی. *علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۴، ۲۷-۱۸.

حسنی‌پاک، علی اصغر (۱۳۹۰) . زمین‌آمار. انتشارات دانشگاه تهران. ص ۳۱۴.

زارعیان، غلامرضا و حسن‌شاهی، محمدحسن (۱۳۸۳). بازنگری مطالعات نیمه‌تفضیلی خاکشناسی و تناسب اراضی برای محصولات عمده زراعی در دشت دارنگون (استان فارس). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. موسسه تحقیقات خاک و آب.

زارعیان، فاطمه؛ محمودی، جلال و جوادی، محمدرضا (۱۳۹۳). پراکنش خصوصیات خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در دشت دره ویسه کرج. *پژوهش‌های خاک*، ۲۸، ۵۲۰-۵۱۱.

شعبانی، حدیثه؛ دلاور، محمد امیر؛ صفری، یاسر و علمداری، پریسا (۱۳۹۸). پهنه‌بندی و تحلیل مکانی برخی خصوصیات خاک در اراضی دانشگاه زنجان. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۷، ۱۷۸-۱۶۴.

شعبانی، محمد (۱۳۸۷). تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارسنجان). *مهندسی منابع آب*، ۱(۱)، ۵۷-۴۷.

طاعتی، عباس؛ سرمدیان، فریدون؛ متقیان، حمیدرضا و موسوی، سید روح اله (۱۳۹۹). پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های سطحی و عمقی پروفیل خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار در بخشی از اراضی دشت قزوین. *فصلنامه انسان و محیط زیست*، ۱۸، ۸۱-۶۷.

عسکری، سولماز؛ اولیایی، حمیدرضا؛ صفری، یاسر و صدقی اصل، محمد (۱۳۹۸). تغییرپذیری مکانی برخی ویژگی‌های حاصلخیزی خاک متاثر از

تغییرات کاربری اراضی درمنطقه یاسوج. *مجله مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۹، ۸۱-۶۵.

علیزاده، علی؛ شیخ الاسلامی، علی؛ کیادلیری، هادی؛ خزائی پول، صادق؛ سلمانیان، محمدرضا و رمضانی‌پول، محمد (۱۳۹۸). دست‌یابی به ابعاد بهینه شبکه آماربرداری جنگل با استفاده از روش واریوگرافی در زمین‌آمار (بررسی موردی: سری ۵ طرح جنگل‌داری صفارود رامسر). *پژوهش و توسعه جنگل*، ۵: ۶۵۶-۶۴۵.

فروغی‌فر، حامد؛ جعفرزاده، علی اصغر ؛ ترابی گلسفیدی، حسین؛ علی‌اصغرزاد ، ناصر؛ تومانیان، نورایر و داوتگر، ناصر (۱۳۹۰). تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی در شکل‌های اراضی مختلف دشت تبریز. *نشریه دانش آب‌وخاک*، ۲۱، ۲۱-۱.

کاظمی پشت مساری، حسین؛ طهماسبی سروستانی، زین‌العابدین؛ کامکار، بهنام؛ شتایی، شعبان و صادقی، سهراب (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های زمین‌آمار جهت تخمین و پهنه‌بندی عناصر غذایی پرمصرف اولیه در برخی اراضی کشاورزی استان گلستان. *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۲، ۲۱۸-۲۰۱.

مهماندوست، فاطمه؛ اولیایی، حمیدرضا؛ ادهمی، ابراهیم و نقی‌ها، رضا (۱۳۹۷). اثر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک منطقه سروک، شهرستان یاسوج. *نشریه آب‌وخاک*، ۳۲(۳)، ۵۹۹-۵۸۷.

نصیری، الهام؛ اولیایی، حمیدرضا؛ صفری، یاسر و صدقی اصل، محمد (۱۳۹۸). ارزیابی زمین‌آماری تغییرات برخی ویژگی‌های خاک در پی تخریب جنگل‌های بلوط در دشت مختار یاسوج. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۷، ۹۷-۸۳.

REFERENCES

Ahmadi, A., Toranjzar, H. & Kazemi, A. (2019). Mapping Soil Salinity in Boulagh (Saveh) Saline Lands Using Geostatistical Methods. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8 (19): 1-14. (In Persian)

Ahmadivand, M., Zamani, J., Shekofteh, H. & Abbaszadeh Afshar, F. (2023). The effect of land use change on some physical and chemical properties of soil. *Environmental Erosion Research*, 13 (2): 210-234. (In Persian)

Alizadeh, A., Sheykheslami, A., Kiadaliri, H., Khazaei Poul, S., Salmanian, M. & Ramezani Poul, M. (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)

Asadzadeh, F., Khosraviaqdam, K. Yaghmaeian Mahabadi, N. & Ramezanpour, H. (2019). Spatial variation of mineral particles of the soil using remote sensing data and geostatistics to the soil texture interpolation. *Journal of Water and Soil*, 32 (6): 1207-1222. (In Persian)

Askari, S., Owliaie, H.R., Safari, Y. 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., Mohammad Zamani, S. & Khormali, F. (2007). Spatial variability of some soil properties for site specific farming in northern Iran. *International Journal of Plant Production* 1(2): 225-236

Bangroo, S.A., Sofi, J., Bhat, M., Mir, Sh., Mubarak, T. & Bashir, O. (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

Behnam, V., Gholamalizadeh Ahangar, A., Rahmanian, M. & Bameri A. (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.

Bijanzadeh, E., Mokarram, M. & Naderi, R. (2014). Applying spatial geostatistical analysis models for evaluating variability of soil properties in Eastern Shiraz, Iran. *Iran Agricultural Research*, 33, 35-46.

Blake, G.R. & Hartge, K. (1986). Bulk density. P. 363-375. A. Klute (ed.) Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods. Part 1. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Cao, C., Jiang, S., Ying, Z., Zhang, F. & Han, X. (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.

Chapman, HD. (1965). Cation exchange capacity. In: Black CA, editor. Methods of soil analysis. Part 2. Madison (WI): American Society of Agronomy. p. 891–901.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F. & Konopka, A.E. (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

Chen, H., Shen, Z., Liu, G., & Tong, Z. (2009). Spatial variability of soil fertility factors in the Xiangcheng tobacco planting region, China. *Frontiers of Biology in China*, 4:3. 350-357.

Chen, S., Arrouays, D., Leatitia Mulder, V., Poggio, L. & 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

Danesh, M., Taghipour, F., Emadi, M. & Ghajar Sepanlou, M. (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

Foroughifar, H., Jafarzadah, A.A., Torabi, H. Gelsefidi, H. Aliasgharzadah, N. Toomanian, N. & Davatgar, N. (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)

Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. In 'Methods of soil analysis, Part 1. Agronomy Monograph, Vol. 9'. 2nd ed. (Ed. A. Klute) pp. 383–411. (American Society of Agronomy: Madison, WI, USA) Geocarto International 37 (26). tps://doi.org/ 10.1080/ 10106049. 2022.2048905

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 483p.

Gunarathna, M. H. J. P., Nirmanee, K. G. S., & Kumari, M. K. N. (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.

Habashi, H., Hosseini, Mohammadi, J. & Rahmani, R. (2007). Geostatistic applied in forest soil studying processes. *Journal of Agricultural Science and Natural Science*, 14: 18-27. (In Persian)

Hasani Pak, A.A. (2011). Geostatistics. Tehran University Press, 314 P. (In Persian)

Jalali, Gh., Tehrani, M.M., Broomand, N. & Sanjari, S. (2013). Comparison of geostatistical methods for mapping the spatial distribution of some nnutrients in the East of Mazandaran Province. *Soil Researches*, 27(2): 195-204. (In Persian)

Johnson, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. & Lucas, N. (2001). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. GIS by ESRI. Redlands, USA. 306 p.

Kazemi Poshtmasari, H., Tahmasebi, Z., Kamkar, B., Shataei, Sh. & Sadeghi, S. (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)

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264: 301-311.

Mehmandoost, F., Owliaie, H.R., Adhami, E. & Naghiha, R. (2018). Effect of land use change on some physicochemical and biological properties of the soils of Servak Plain, Yasouj region. Soil and Water, 32(3): 587-599. (In Persian)

Nasiri, E., Owliaie, H.R., Safari, Y. & Sedghi Asl, M. (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)

Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and matter. In 'Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy Monograph, Vol. 9'. 2nd ed. (Eds. AL Page, RH Miller, DR Keeney) pp. 539–577. (American Society of Agronomy: Madison, WI, USA)

Nelson, R.E. (1982) Carbonate and gypsum. In 'Methods of soil analysis. Part 2'. (Eds AL Page, RH Miller, DR Keeney) pp. 181–197. (American Society of Agronomy: Madison, WI, USA).

Owliaie, H. R., Adhami, E. & Najafi Ghiri, M. (2022). 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)

Qu, L., Lu, H., Tian, Z., Schoorl, J.M., Huang, B., Liang, Y., Qiu, D. & Liang, Y. (2024). Spatial prediction of soil sand content at various sampling density based on geostatistical and machine learning algorithms in plain areas. *Catena*, 234: 107572. https://doi.org/10.1016/j.catena. 2023.107572

Quine, T. A. & Zhang, Y. (2002). An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties and crop production within an agricultural field in Devon, U.K. J. *Soil and Water Conservation*. 57: 50-60.

Santra, P., Chopra, U. K. & Chakraborty, D. (2008). Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm. *Current Science*, 95:7. 937-945.

Sarangi, A., Madramootoo, C.A., & Enright, P. (2006). Comparison of spatial variability techniques for runoff estimation from a Canadian Watershed. *Biosystems Engineering*, 95:2. 295-308.

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.

Shabani, H., Delavar, M.A., Safari, Y. & Alamdari, P. (2018). Spatial variability of some soil characteristics

in lands of Zanjan University. *Applied Soil Researcg*, 7(4): 164-178. (In Persian)

Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources. Conservation Service. USA.

Taati, A., Sarmadian, F., Motaghian, H. & Mousavi, R. (2020). Mapping features of surface and depth, soil profiles by using geostatistical techniques in part of Qazvin Plain. *Human and Environment*, 52: 67-81. (n Persian)

Utset, A., T. Lopez, & M. Dıaz, (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.

Wackernagel, H. (2003). Geostatistical models and kriging, IFAC Proceedings, 36: 543-548.

Webster, R. & Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for environmental scientists (Second Edition ed.). The Atrium, Southern Gate, Chichester, England: John Wiley and Sons. 330 p.

Wu, W., Xiu, D. T. & Liu, H. B. (2008). Spatial variability of soil heavy metals in the three gorges area, Multivariate and Geostatistical analysis. *Journal of Environmental Monitoring Assessment*, 157, 63-71.

Xing-Yi, Z., Yue-Yu', S., Xu Dong, Z., Kai, M. & Herbert, S.J. (2007). Spatial Variability of Nutrient Properties in Black Soil of Northeast China. *Pedosphere*, 17(1), 19-29.

Zareian, Gh. & Hasanshahi, M.H. (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. (In Persian)

Zareian, F., Mahmoudi, J. & Javadi, M.R. (2014). Predicating the spatial variability of some soil properties by using geostatistic methods in Darreh Viseh, Karaj. *Soil Researches*, 28(3): 511-520. (In Persian)

Zeraatpisheh, M., Bottega, E.L. Bakhshandeh, E., Owliaie, H.R., Taghizadeh-Mehrjardi, Kerry, R., Scholten, T., & Xu, M. (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

Zhang, X., Chen, S., Xue, J., Wang, N., Xiao, Y., Chen, Q., & Shi, Z. (2023). Improving model parsimony and accuracy by modified greedy feature selection in digital soil mapping. *Geoderma*, 432: 116383.

Zhang, X., Lin, F., Jiang, Y., Wang, K., & Feng, X. L. (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.

Geostatistical assessment of the spatial distribution of some Soil properties of the soils of Darengan region with different land uses, Fars province

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Mapping of soil properties is an important operation as it plays an important role in the knowledge about soil properties and how it can be used sustainably. Soil properties vary in different spatial areas due to the combined effect of biological, physical, and chemical processes over time, and can vary within farmland or at the landscape scale. Different land use and management practices greatly impact soil properties, and knowledge of the variation in soil properties within different land uses is essential in determining production constraints related to soil characteristics. A tool often used to analyze how soil properties are spatially distributed in an area is geostatistics. It is effective for understanding the magnitude and structure of the spatial variability of the physical and chemical properties. Darengan region, located in the southwest of Shiraz city, is an important agricultural region with pasture, agricultural and garden uses, which has developed a lot in recent years, and a large area of pasture has been changed to agricultural land use. Therefore, this study was conducted to assess geostatistical methods for the spatial distribution of some soil properties of the soils of this region.

Material and Methods

The study area, with an area of about 20000 ha, is located 40 km southwest of Shiraz city, in the center of Fars province. The annual rainfall and temperature of the region are about 340 mm and 17.1°C, respectively. A total of 134 soil samples (from pasture and agricultural land uses) were collected from the surface (0–30 cm) at an approximate interval of 1.0 × 1.0 km on a regular grid design. Routine soil analysis includes soil texture, pH, EC, CCE, BD, OC, and CEC were measured in the laboratory. Descriptive statistical analysis was carried out and in geostatistical analysis, the semivariogram was calculated for each soil variable. Different models of two deterministic and geostatistical methods were used to estimate the soil characteristics in unsampled points in the study area. Deterministic methods include global polynomial interpolation, local polynomial interpolation, inverse distance weighting and Radial Basis Function. Geostatistical methods include Kriging, Cokriging and Empirical Bayesian Kriging. In all three mentioned geostatistical methods, three types of simple prediction; ordinary prediction and universal prediction, were used. In this study, 104 models, including 5 deterministic models and 99 geostatistical models, were used to select the most suitable model with the strongest spatial structure. All geostatistical and deterministic studies were carried out in ArcGIS 10.7.1 to achieve the most suitable interpolation model in terms of accuracy and precision.

Results and Discussion

The results revealed that, based on precision criteria, exponential co-kriging was the best method for interpolating sand, EC, CCE, pH, BD, spherical co-kriging for clay, OC., and CEC, and co-kriging rational quadratic for silt. The spatial structure was obtained for CCE, weak, for organic carbon, medium, and for the other variables, strong. Among the characteristics studied, the variables of silt, clay and CEC have the lowest range, and EC has the highest range. Variography analysis indicated that the ranges of influence for sand, silt, clay, EC, CCE, OC, pH, BD, and CEC, were 2733, 2000, 2004, 10553, 2290, 2584, 3448, 2361 m, respectively, and the RSME varied between 0.017 (for BD) and 5.75 (for CCE). For geostatistical analysis of soil variables, the value of the nugget: sill ratio ranges from 0% (sand, clay, BD, and CEC) to 175.5% (CCE), which indicates that internal (e.g., the soil-forming processes) factors were dominant over external (e.g., human activities) factors. However, the soil sand, silt, clay, EC, pH, BD, and CEC had a strong spatial dependency with a nugget: sill ratio of <25% since it was induced by structural factors. Meanwhile, OC had moderate spatial dependency with a nugget: sill ratio of 25–75% since this variable was mostly determined by both internal and external factors and CCE had weak spatial dependency with a nugget: sill ratio of >75%. Based on the zoning map of the studied properties, the areas with agricultural land use had greater organic carbon, clay, CEC, EC and lower pH. The results of this study showed the effectiveness of geostatistics and GIS techniques as powerful tools for spatial management of soil characteristics. In general, it seems that the studied properties were mainly influenced by factors such as topography, parent material and land use. Considering the variability of soil characteristics as well as the different influential ranges of these variables, it is suggested that for reducing costs, the sampling intervals of the soils be based on the influential range.

Keywords: Zoning, Spatial Variability, Semi-Variable, Soil Properties.