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

Spatial variability assessment of some soil nutrient elements using geostatistical methods (Case study: Chadegan, Isfahan province)

Ali Reza Marjovvi[1] | Parisa Mashayekhi[2]✉

1. Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran. E-mail: amarjovvi@yahoo.com
2. Corresponding Author, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran. E-mail: E-mail: mashayekhi_enj@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 10, 2024

Revised: June. 8, 2024

Accepted: June. 19, 2024

Published online: Aug. 2024

Keywords:
GS+ Software,
Semi-Variable,
Soil Fertility Spatial Distribution.

ABSTRACT

Evaluating the spatial variability of soil properties is an important prerequisite for precision agriculture. This research was conducted on 84 soil samples from different areas of Chadegan city (Isfahan province). With the aim of evaluating the spatial variability of some soil nutrient elements, including organic carbon, soil-available phosphorus, potassium, zinc, copper, manganese, and iron. The spatial correlation of each variable with a specific semi-variable and the best fitting model for each variable were selected. Interpolation was done using normal Kriging and Inverse Distance Weighting with powers of 1 to 3 methods. The accuracy of the distribution maps of these variables was evaluated by the Mean bias error (MBE) the standard root mean square error (NRMSE), and the coefficient of determination (R2). The results showed that all studied properties had moderate spatial dependence, which shows the effect of management factors such as fertilization, plowing, irrigation, etc. on these variables. The exponential model was the most accurate to predict organic carbon, phosphorus, potassium and zink variables while iron, copper, and manganese were best fitted with an spherical model. For phosphorus, iron, and copper variables, the Inverse Distance Weighting with the power of 1 (IDW-1) and for organic carbon, potassium, zinc, and manganese normal kriging methods were recognized as the best interpolation methods. According to the spatial distribution maps, the studied area is sufficient in terms of potassium, copper and manganese nutrients, and in other cases, the use of fertilizers and organic materials is necessary to increase soil fertility.

Cite this article: Marjovvi, A. R., & Mashayekhi, P. (2024). Spatial variability assessment of some soil nutrient elements using geostatistical methods (Case study: Chadegan, Isfahan province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (6), 1001-1016. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373779.669677

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373779.669677

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۶ شاپا: ۲۴۲۳-۷۸۳۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ارزیابی تغییرات مکانی برخی عناصر غذایی خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (مطالعه موردی: شهرستان چادگان، استان اصفهان)

علیرضا مرجوی[۱] | پریسا مشایخی[۲]✉

۱. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران. رایانامه: amarjovvi@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران. رایانامه: mashayekhi_enj@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۳۰
تاریخ انتشار: شهریور ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
تغییرات مکانی،
تغییرنما،
حاصلخیزی،
نرم‌افزار GS+.

چکیده

ارزیابی تنوع مکانی و پهنه‌بندی ویژگی‌های مختلف خاک پیش‌نیاز مهمی برای کشاورزی دقیق است. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات مکانی برخی عناصر غذایی قابل‌استفاده گیاه در خاک شامل ماده آلی، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز بر روی ۸۴ نمونه خاک از اراضی مناطق مختلف شهرستان چادگان (استان اصفهان)، انجام شد. همبستگی مکانی هر متغیر با نیم‌تغییرنما مشخص و بهترین مدل برازش داده‌شده برای هر متغیر تهیه شد. روش‌های درون‌یابی با استفاده از روش‌های کریجینگ معمولی و روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان‌های ۱ تا ۳ انجام شد و میزان دقت نقشه پراکنش این متغیرها با معیارهای آماری میانگین انحراف خطا و ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد و ضریب تبیین محاسبه شد. نتایج تجزیه زمین‌آماری نشان داد که همه متغیرهای موردبررسی، از همبستگی مکانی متوسطی در سطح منطقه برخوردار هستند که نشان‌دهنده تأثیر عوامل مدیریتی مانند کوددهی، شخم، آبیاری و ... بر روی این متغیرها است. بهترین مدل ساختار مکانی برای متغیرهای ماده آلی، فسفر، پتاسیم و روی مدل نمایی و برای متغیرهای آهن، مس و منگنز کروی بود. بر اساس نتایج، برای متغیرهای فسفر، روی و منگنز روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان ۱ و برای سایر متغیرها روش کریجینگ معمولی به عنوان بهترین روش‌های درون‌یابی شناخته شدند. بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی، منطقه از نظر عناصر غذایی پتاسیم، مس و منگنز در حد کفایت بوده و در سایر موارد مصرف کود و مواد آلی برای افزایش حاصلخیزی خاک ضروری است.

استناد: مرجوی، علیرضا و مشایخی، پریسا (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات مکانی برخی عناصر غذایی خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (مطالعه موردی: شهرستان چادگان، استان اصفهان). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۶)، ۱۰۱۶-۱۰۰۰. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373779.669677

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.373779.669677

مقدمه

مدیریت پایدار اکوسیستم مستلزم شناخت و ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی در ویژگی‌های آن به‌منظور بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع است. اگر چه وجود تغییرات مکانی در ویژگی‌های خاک امری بسیار معمول است؛ اما شناخت این تغییرات به‌ویژه در اراضی کشاورزی جهت برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت امری ضروری است (Hashemi et al. 2016). وجود تنوع مکانی در ویژگی‌های مختلف خاک باعث ایجاد الزام در مدیریت خاص مزرعه برای تغذیه متعادل گیاه جهت دستیابی به تولید محصول پایدار است. روش‌های مدیریت مکانی ویژگی‌های خاک، عمدتاً مبتنی بر تحلیل‌های زمین‌آماری پایگاه داده نقاط نمونه‌برداری است (Reza et al., 2018). هدف از این روش‌ها، مدیریت تغییرات بین منطقه‌ای و درون منطقه‌ای ویژگی‌های مختلف از جمله حاصلخیزی خاک است به‌گونه‌ای که قطعات مختلف زمین، انواع و مقدار ورودی‌ها (نهاده‌های مختلف مانند کود، آب و ...) را دقیقاً بر اساس نیاز دریافت کنند. ویژگی‌های خاک دارای تغییرات مکانی و زمانی از مقیاس‌های کوچک تا بزرگ هستند که تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی ازجمله پارامترهای متأثر از مواد مادری خاک و ویژگی‌های غیر ذاتی مانند عملیات مدیریتی خاک، کوددهی و تناوب زراعی قرار می‌گیرد (Mulder et al., 2016).

تعیین مدیریت مزرعه بر اساس مجموعه‌ای از نقاط گسسته نمونه‌برداری، امکان‌پذیر نبوده و بایستی این داده‌ها در قالبی پیوسته از اطلاعات تبدیل گردند. بدین منظور، به‌کارگیری ابزارهای تجزیه و تحلیل و پردازش ریاضی و آماری، که توانایی به‌کارگیری هم‌زمان اطلاعات کمی و عددی متغیر موردنظر و اطلاعات مربوط به موقعیت نسبی جغرافیایی داده‌ها را دارند، ضروری است. امروزه روش‌های زمین‌آماری به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی توزیع مکانی ویژگی‌های مختلف خاک در مناطق کشاورزی به‌منظور مدیریت بهتر کاربری اراضی مورداستفاده قرار می‌گیرند (Liu et al., 2016). مطالعات مختلف نشان می‌دهد که پهنه‌بندی توزیع مکانی عناصر غذایی موجود در خاک یک روش کارآمد برای تشخیص محدودیت‌های مرتبط با حاصلخیزی خاک و مدیریت آن است (Sharma et al., 2021).

در بررسی انجام‌گرفته توسط Linnik et al. (2022) بر روی چگونگی توزیع مکانی عناصر سنگین در خاک نتایج نشان داد که میزان کل مس، سرب و کروم دارای وابستگی مکانی متوسط (نسبت قطعه به آستانه بین ۳۱ تا ۳۸ درصد) و شاخص آلودگی روی دارای وابستگی مکانی قوی بود (نسبت قطعه به آستانه بین ۰ تا ۲۱/۴ درصد).

در بررسی انجام‌شده توسط آقایی پور و همکاران (۱۳۹۷)، ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، واکنش خاک، درصد رس و سیلت خاک دارای پیوستگی مکانی متوسط و تنها دو ویژگی قابلیت هدایت الکتریکی و شن دارای پیوستگی مکانی قوی بودند. در این پژوهش، روش وزن دهی عکس فاصله در مقایسه با کریجینگ معمولی در ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، اسیدیته و سیلت دارای دقت بیشتر و خطای کمتری بود. از طرفی، اختلاف زیادی بین دو روش وزن دهی عکس فاصله و کریجینگ معمولی در ویژگی‌های قابلیت هدایت الکتریکی، رس و شن مشاهده نشد.

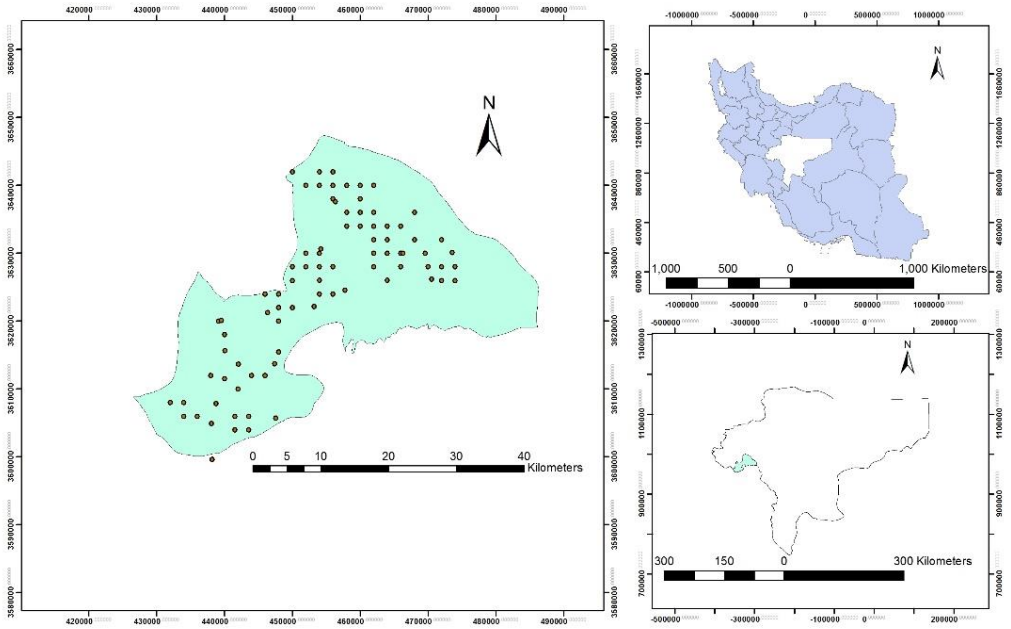
Najafian et al. (2012) ، به‌منظور بررسی اهمیت الگوهای مکانی ویژگی‌های حاصلخیزی خاک و سایر عوامل بیرونی برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی در اراضی مرودشت در مرکز ایران به این نتیجه رسیدند که مقادیر نیتروژن و پتاسیم موجود در خاک همبستگی مکانی متوسط داشتند. دامنه ساختار مکانی برای فسفر قابل‌دسترس بیشترین مقدار و برابر ۴۸۰ متر و برای نیتروژن کل ۴۲۹ متر بود. نتایج پژوهش Qiu et al. (2011) در منطقه‌ای با وسعت ده هکتار در اطراف دانشگاه لینکلن در کالیفرنیا، که دارای سابقه کشت طولانی غلات را داشت، نشان دادند باوجود مدیریت یکنواخت و مسطح بودن منطقه ازلحاظ توپوگرافی، سطوح مواد مغذی طی سال‌های متمادی، تغییرات قابل‌توجهی داشتند. برای نمونه مقادیر فسفر کل در منطقه از ۱۴ تا ۵۳ میکروگرم در گرم متغیر بود. همچنین دامنه همبستگی مکانی برای ویژگی‌های مختلف، از ۲۶۸ متر برای نیتروژن تا ۷۰۰ متر برای فسفر متفاوت بود. Jaiver et al.(2011)، به‌منظور ارزیابی تأثیر خصوصیات شیمیایی خاک بر روی عملکرد محصول ذرت در راستای توصیه‌های مدیریتی و حاصلخیزی در مکان‌های خاص، تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های شیمیایی خاک ازجمله نیتروژن، پتاسیم و فسفر را در منطقه‌ای از کشور کلمبیا مورد مطالعه قراردادند. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه این متغیرها توسط روش زمین‌آمار نشان داد که توزیع مکانی و همبستگی این ویژگی‌ها با عملکرد محصول رابطه مستقیم دارد. در پژوهشی به منظور آنالیز مکانی ویژگی‌های خاک در شرق شیراز، بهترین مدل برای متغیرهای واکنش خاک، درصد اشباع و پتاسیم با روش کریجینگ معمولی، مدل نمایی و برای متغیرهای قابلیت هدایت الکتریکی، شن، سیلت، رس، نیتروژن و فسفر، مدل کروی تعیین شد. همچنین مشخص شد که واکنش خاک دارای کمترین وابستگی مکانی با دامنه ۱۹/۱ متر و هدایت الکتریکی دارای بیشترین وابستگی مکانی با دامنه ۱۳۴ متر در منطقه موردمطالعه بودند (Bijanzadeh et al., 2014). پژوهش انجام‌گرفته توسط بهنام و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که روش کوکریجینگ معمولی برای رس، کلسیم کربنات معادل و کربن آلی، روش وزن‌دهی معکوس فاصله

برای سیلت و قابلیت هدایت هیدرولیکی خاک و روش کریجینگ معمولی برای شن در مقایسه با سایر روش‌های به‌کاررفته مناسب‌تر بود و تخمین‌های دقیق‌تری ارائه داد. شهرستان چادگان واقع در غرب استان اصفهان از جمله مناطق تأثیرگذار در اقتصاد کشاورزی استان اصفهان است. وجود آب و هوای معتدل در این منطقه و میزان بارش بالاتر (میانگین ۲۷۵ میلی‌متر) از میانگین بارش‌های کل استان اصفهان (۱۲۰ میلی‌متر) شرایط اقلیمی ویژه‌ای را جهت توسعه فعالیت‌های کشاورزی دیم و آبی در این منطقه به وجود آورده است. میزان اراضی کشاورزی شهرستان ۳۴ هزار هکتار است که سطح زیر کشت محصولات زراعی به میزان۳۴۰۰۰ هکتار، محصولات باغی۲۰۰۰ هکتار و اراضی آیش ۱۲۴۶۰ هکتار برآورد شده است و۱۱۲۴۰ هکتار از این اراضی به‌صورت آبی و ۸۳۰۰ هکتار به‌صورت دیم کشت می شوند. مهمترین محصولات زراعی شهرستان شامل گندم، سیب‌زمینی، حبوبات و علوفه‌جات است و میزان تولید محصولات زراعی آن سالیانه به ۱۳۳۰۰۰ تن می‌رسد. مهمترین محصولات باغی شهرستان شامل بادام، گردو، هلو، زرد الو و ... بوده و میزان تولید محصولات باغی آن سالیانه۱۳۵۰ تن است (پورتال سازمان جهادکشاورزی شهرستان چادگان، ۱۴۰۳). آگاهی از میزان عناصر غذایی قابل‌استفاده گیاه در خاک و نیز چگونگی توزیع مکانی این عناصر، برای انجام توصیه کودی بهینه بسیار ضروری بوده و نقش بسیار مهمی در حاصلخیزی خاک و مدیریت کوددهی دارد و از مصرف نامتعادل آنها که اغلب باعث محدودیت رشد، کاهش کیفیت گیاه و یا آلودگی محیطزیست می‌شود، جلوگیری به‌عمل خواهد آورد. با توجه به موارد فوق پژوهش حاضر به منظور بررسی پراکنش مکانی برخی عناصر غذایی موردنیاز گیاه، موجود در خاک و نیز میزان کربن آلی خاک به عنوان یکی از شاخص‌های مهم حاصلخیزی خاک با روش‌های زمین‌آماری در شهرستان چادگان، به عنوان یکی از مناطق مستعد کشاورزی دیم و آبی در استان اصفهان، انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

شهرستان چادگان در محدوده‌ای به مختصات ۵۰ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است؛ مرکز شهرستان در فاصله تقریبی ۱۱۵ کیلومتری غرب مرکز استان اصفهان واقع گردیده است. این شهرستان با ارتفاع۲۴۰۰ متر از سطح دریا و مساحت ۱۱۱۵ کیلومترمربع دارای آب و هوای معتدل کوهستانی با متوسط بارندگی سالیانه ۲۷۵ میلی‌متر است. برای انجام این پژوهش، از ۸۴ نقطه از اراضی کشاورزی شهرستان چادگان نمونه‌برداری به‌عمل آمد. این نقاط به‌صورتی تعیین گردید که کل اراضی آبی، دیم و آیش را پوشش دهد. نمونه‌برداری خاک به‌صورت مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتر انجام گرفت. نقاط مختلف نمونه‌برداری شده در مناطق مختلف استان در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مطالعاتی استان اصفهان

تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه ابتدا هوا خشک و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. کربن آلی به روش والکلی بلاک (Walkley and Black, 1934) فسفر قابل‌جذب به وسیله عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم در واکنش معادل ۸/۵ (Olsen and Sommer, 1982)، پتاسیم قابل‌استفاده گیاه از طریق عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با دستگاه فلیم فتومتر(Page et al., 1992) و عناصر ریزمغذی از روش عصاره‌گیری با د.ت.پ.آ[1] با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Page et al., 1992) اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری و زمین‌آماری

به منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دست‌یابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری ویژگی‌های مختلف، آماره‌های توصیفی شامل میانگین، چولگی، کشیدگی، ضریب تغییرات، واریانس و انحراف معیار برای هر متغیر با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ محاسبه شد. برای بررسی توزیع و آزمون نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از آزمون کلموگروف – اسمیرنوف[2] استفاده شد (Bogunovic et al., 2017). برای بررسی و تشریح ارتباط و ساختار فضایی از تجزیه و تحلیل تغییرنما یا واریوگرام[3] از نرم‌افزار +GS نسخه ۹ استفاده شد. تغییرنما، یکی از ابزارهای اساسی زمین‌آمار برای نشان دادن میزان وابستگی مکانی متغیرها است. تغییرنما کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آنها نشان می‌دهد. اگر یک ویژگی به‌طور مداوم در ابعاد مکانی تغییر کند آن را می‌توان با تغییرنما نشان داد. تغییرنماها تغییرات فاصله‌ای یا تغییرپذیری ساختاری متغیرها را نشان می‌دهند (Zheng et al. 2008).

هر تغییرنما برای توضیح ساختار مکانی شامل سه پارامتر اساسی اثر قطعه‌ای[4]، دامنه‌تاثیر[5] و آستانه[6] است (Utset et al, 2000). اثر قطعه‌ای نشان‌دهنده خطای آزمایش یا منابع مکانی تغییر در فواصل کوچک‌تر از فاصله نمونه‌برداری است. آستانه نشان‌دهنده حداکثر مقدار نیم‌تغییرنما و بیانگر تنوع است و دامنه تأثیر حداکثر فاصله‌ای است که پس از آن ساختار مکانی دیگر وجود نداشته و نیم‌تغییرنما به مقدار ثابتی می‌رسد (Rizwan et al., 2016). میزان شدت و درجه وابستگی مکانی متغیر ناحیه‌ای از تقسیم واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل یا حد آستانه به دست می‌آید. اگر این نسبت کم‌تر از ۲۵ درصد باشد، وابستگی مکانی متغیر ضعیف، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد وابستگی مکانی متوسط و اگر بالاتر از ۷۵ درصد باشد، وابستگی مکانی متغیر قوی است (Hu et al., 2006). همچنین در صورتی‌که نسبت همبستگی در مورد ویژگی‌ها برابر ۱۰۰ درصد گردد و یا اینکه شیب منحنی تغییر نما نزدیک به صفر باشد ویژگی مربوطه فاقد وابستگی مکانی خواهد بود و اگر نسبت هم‌بستگی برای ویژگی صفر شود بیانگر یک پیوستگی در وابستگی مکانی است (Vieira and Gonzalez A, 2003).

معادله نیم‌تغییرنما با رابطه ۱ قابل محاسبه است:

رابطه ۱)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(Xi) - Z(Xi+h)]\text{^}2$$

در رابطه ۱، γ(h) نیم‌تغییر نمای تجربی، N(h) تعداد کل جفت نقاطی که به فاصله h از یکدیگر قرار گرفته‌اند و Z(xi+h) و Z(xi) به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده متغیر Z در نقاط xi+h و xi است.

در این بررسی با استفاده از نرم‌افزار +GS مدلی که دارای کمترین مجموع مربعات باقیمانده و بیشترین ضریب تبیین بود، از میان مدل‌های کروی، نمایی، گوسی و خطی و غیره بر واریوگرام تجربی برازش داده شد (Sharma et al., 2002). تغییرپذیری ویژگی‌های خاک می‌تواند تحت تأثیر فاکتورهای ذاتی مانند فاکتورهای تشکیل خاک و فاکتورهای مدیریتی مانند کوددهی باشد. غالباً وابستگی مکانی قوی در اثر فرآیندهای داخلی (ذاتی) و وابستگی‌های مکانی ضعیف در اثر فرآیندهای خارجی (مدیریتی) حاصل می‌شود (Zhang et al., 2008).

در این مطالعه به منظور برآورد مقادیر متغیرهای خاک در نقاط نمونه‌برداری نشده از روش‌های وزن‌دهی عکس فاصله[7] و کریجینگ[8]

---

1 .DTPA
2 . Kolmogorov–Smirnov test
3 . variogram
4 . Nugget effect
5 . Range of influence
6 .Sill
7 . Inverse distance weighting
8 . kriging

استفاده گردید. روش کریجینگ (رابطه ۲) بر اساس میانگین متحرک وزنی بوده و می‌توان آن را بهترین تخمین‌گر خطی ناریب با کمترین مقدار واریانس خواند (محمدی، ۱۳۸۵).

رابطه ۲)
$$Z(X0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i * Z(Xi)$$

در این رابطه Z(X0) مقدار تخمین‌زده شده Z در نقطهX0 ، λiوزن نسبت داده‌شده به متغیر Z در نقطه Xi و n تعداد نقاط همسایگی است.

وزن دادن معکوس فاصله (IDW) یکی دیگر از روش‌های تخمین زمین‌آماری است که پایه آن وزن‌دهی براساس عکس فاصله تا نقطه تخمین است. وزن‌دهی بیشتر به نزدیک‌ترین نمونه‌ها و اختصاص وزن کمتر به نمونه‌هایی است که در فاصله بیشتر قرار گرفته‌اند. در این روش مقدار متغیر در نقاط نمونه‌برداری نشده از روی نقاط مجاورش با استفاده از رابطه (۳) تخمین زده می‌شود. با این تفاوت که در این روش وزن‌ها تنها با توجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به نحوه پراکندگی نقاط حول نقطه مورد تخمین، تعیین می‌شوند. بدین ترتیب به نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و به نقاط دورتر وزن کمتری اختصاص داده می‌شود (Isaaks and Srivastava, 1989).

رابطه ۳)
$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\pi}}{\sum_{i=1}^{n} D_i^{-\pi}}$$

در این رابطه Di فاصله iامین نقطه مشاهده‌شده تا نقطه مورد تخمین، π توان وزن‌دهی فاصله و n تعداد نقاط همسایگی است.

ارزیابی روش‌ها

در این تحقیق از معیارهای آماری ریشه مربعات خطای نرمال شده، ضریب تبیین و میانگین انحراف خطا برای ارزیابی دقت روش‌ها استفاده شد (روابط ۴ تا ۷). علاوه بر معیارهای ذکرشده، ضریب همبستگی (r) بین مقادیر برآورد شده و واقعی نیز محاسبه شد.

رابطه ۴)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Z^{*}(Xi) - Z(Xi))^2}$$

رابطه ۵)
$$R2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}((Z(X_i)) - (Z^{*}(\hat{X}_i))^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2}$$

رابطه ۶)
$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Z^{*}(Xi) - Z(Xi)\right)$$

رابطه ۷)
$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}}$$

در این روابط Z*(xi) و Z(xi) به ترتیب مقادیر تخمین زده‌شده و واقعی متغیر z در نقطه xi و n تعداد کل مشاهدات است. همچنین $\bar{X}$ میانگین مقادیر متغیر اندازه‌گیری‌شده در یک نوع خاک است. معمولاً هر چه مقدار ضریب تبیین بیشتر، ریشه مربعات خطا کمتر و مقدار میانگین انحراف خطا به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت روش بیشتر است (Nourzadeh et al., 2010).

نتایج و بحث

توصیف آماری شامل میانگین، واریانس، ضریب تغییرات، مقادیر حداکثر و حداقل، چولگی و کشیدگی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مطالعاتی در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمون کولموگراف- اسمیرونوف، داده‌های اندازه‌گیری شده در مورد کربن آلی، فسفر، آهن و روی از توزیع نرمال برخوردار نبودند. برای نرمال‌سازی این داده‌ها از تبدیل لگاریتمی استفاده شد.

همان‌طور که مشخص است ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در خاک‌های مورد مطالعه از دامنه نسبتا وسیعی برخوردار بودند؛ به‌گونه‌ای که درصد کربن آلی اندازه‌گیری‌شده در خاک بین ۰/۲ تا ۳/۹ درصد، فسفر بین ۴/۰۴ تا ۵۷/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، پتاسیم بین ۱۵۳/۹۶ تا ۷۸۶، آهن ۱/۱۸ تا ۲۱/۸، روی ۰/۱ تا ۱/۶۲، منگنز ۱/۲ تا ۲۴/۲ و مس بین ۰/۵۲ تا ۳/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر

بودند. با توجه به حدود بهینه غلظت عناصر غذایی در خاک (جدول۲) مشخص است که خاک‌های موردمطالعه در همه موارد در محدوده‌ای از سطوح پایین یعنی در حالت کمبود تا غلظت‌های بالاتر از حد بهینه و در حالت بیش‌بود گسترده شده‌اند که این امر عمدتاً متأثر از شرایط مدیریتی و به‌ویژه مدیریت کوددهی متفاوت در خاک‌های موردمطالعه بوده است.

جدول ۱- آمار توصیفی خصوصیات خاک مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

ویژگی	واحد	میانگین	حداقل	حداکثر	واریانس	انحراف معیار	ضریب تغییرات (٪)	کشیدگی	چولگی
فسفر	$mg\ kg^{-1}$	۲۰/۷۱	۴/۰۴	۵۷/۴	۱۳۷/۴۷	۱۱/۷۲	۵۶/۶	۱/۲۵	۱/۰۷
کربن آلی	%	۰/۹۴۷	۰/۲	۳/۹	۰/۲۸	۰/۵۲	۵۴/۹	۲/۵۹	۱۱/۰۱
پتاسیم	$mg\ kg^{-1}$	۳۷۱/۳۹	۱۵۳/۹۶	۷۸۶	۱۸۹۴۰	۱۳۷/۶	۳۷/۱	۰/۶۷	۰/۴۵
آهن	$mg\ kg^{-1}$	۷/۳۵	۱/۱۸	۲۱/۸	۱۸/۷۱	۴/۳۲	۵۸/۸	۱/۱۵	۱/۲۷
روی	$mg\ kg^{-1}$	۰/۵۹۹	۰/۱	۱/۶۲	۰/۱۵۹	۰/۳۹۹	۶۱/۳	۳/۵	۱/۶۷
منگنز	$mg\ kg^{-1}$	۱۲/۲۷۳	۱/۲۰	۲۴/۲۰	۲۹/۳۷	۵/۴۶	۴۴/۵	-۰/۴۶	۰/۵۷
مس	-	۱/۶	۰/۵۲	۳/۵۶	۰/۳۶	۰/۶۰	۳۷/۷	۰/۸۹	۰/۸۵

جدول ۲- حدود بهینه غلظت عناصر غذایی در خاک‌های زراعی و باغی (ملکوتی و همکاران، ۱۳۸٤)

کربن آلی	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	منگنز	مس
درصد	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک					
>۲	۱۰-۷	۳۰۰-۲۵۰	۱۰	۱	۸	۱

ضریب تغییرات معیاری از میزان تغییرپذیری نسبی است. ضریب تغییرات کمتر یا مساوی ۲۰ نشان‌دهنده تغییرپذیری کم، بین ۲۱ تا ۵۰ ، تغییرپذیری متوسط و بین ۵۰ تا ۱۰۰ تغییرپذیری بالا است (Karimi Nezhad et al. 2015). در بین ویژگی‌های موردمطالعه میزان پتاسیم قابل‌دسترس خاک کمترین ضریب تغییرات را داشت. ضریب تغییرات زیاد نشان‌دهنده تنوع عوامل تأثیرگذار بر رفتار آن متغیر و تحت تأثیر عملیات مدیریتی است. بر اساس نتایج ویژگی‌هایی مانند میزان روی، آهن و فسفر از ضرایب تغییر بالاتری برخوردار بودند که می‌تواند ناشی از اثر ترکیبی عوامل مدیریتی مانند مصرف کود و کاربری‌های متفاوت از اراضی و عوامل ذاتی مانند پستی و بلندی، تغییرات شدید بافتی و وضعیت زهکشی منطقه مورد مطالعه باشد (Foroughifar et al., 2011).

تجزیه و تحلیل نیم تغییرنما

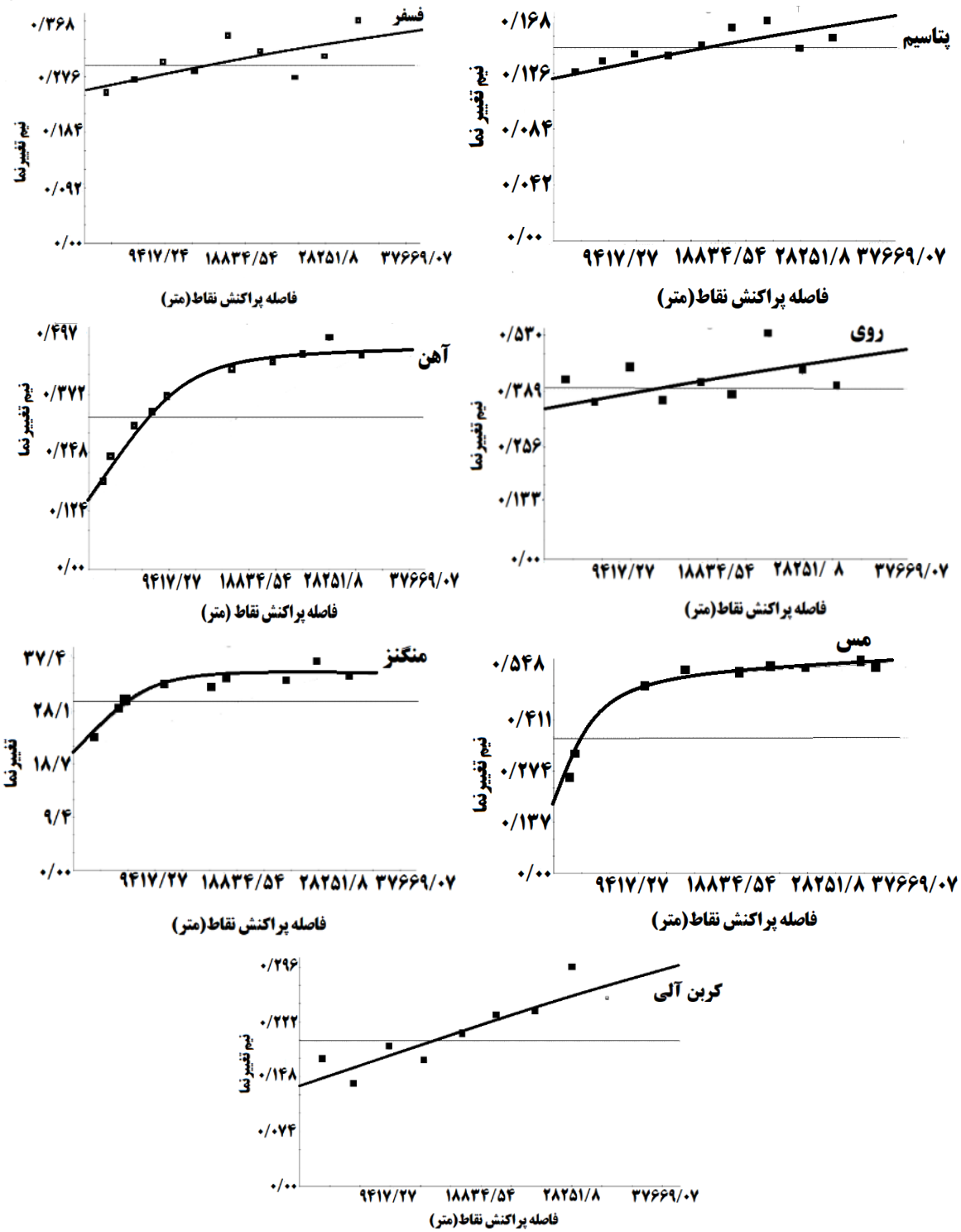
نتایج آنالیز همبستگی مکانی متغیرها و مدل‌های برازش داده‌شده به داده‌های موردمطالعه در جدول ۳ نشان داده شده است. بهترین مدل ساختار مکانی برای متغیرهای فسفر، پتاسیم، ماده آلی و روی، مدل نمایی و برای آهن، منگنز و مس مدل کروی است (جدول ۳).

جدول ۳- مشخصات مدل‌های برازش شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی ویژگی‌های مورد مطالعه

متغیر	مدل واریوگرام	اثر قطعه‌ای	آستانه	دامنه تاثیر (متر)	وابستگی مکانی	کلاس وابستگی مکانی	ضریب تبیین	مجموع مربعات خطا
فسفر	نمایی	۰/۸۵۹	۱/۷۲	۳۲۷۱۰	۴۹/۹	متوسط	۰/۴۹	۵/۸۶×۱۰$^{-۳}$
پتاسیم	نمایی	۰/۱۲۲	۰/۲۴	۴۳۳۰۰	۵۰/۸	متوسط	۰/۵۹	۵/۷۷×۴-۱۰
کربن آلی	نمایی	۰/۰۲۲	۰/۰۵۳۱	۳۴۷۳۰	۶۵/۰	متوسط	۰/۶۵	۰/۰۲۲
آهن	کروی	۰/۱۵۲	۰/۶۸۵	۸۱۱۰۰	۲۲/۱	ضعیف	۰/۸۴	۰/۰۱۴
روی	نمایی	۰/۳۵۶	۰/۷۱۳	۵۳۳۰۰	۴۹/۹	متوسط	۰/۸۵	۰/۰۲۲
منگنز	کروی	۲۰/۸۶	۴۶/۴۴	۸۱۱۰۰	۴۴/۹	متوسط	۰/۸۸	۰/۰۲۳
مس	کروی	۰/۲۵	۰/۶۷۹	۷۶۰۱۰	۳۶/۸	متوسط	۰/۸۱	۰/۰۱۳

شکل ۲ نمودار نیم تغییرنمای همه جهته برای ویژگی‌های موردبررسی را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از پژوهش Sharma et al.(2021) و Zulfikar Khan et al. (2021) همخوانی دارد. فاتحی (۱۳۹۱) نیز در پژوهشی در استان کرمانشاه مدل

نمایی را به‌عنوان بهترین مدل برازش داده‌شده بر تغییرنمای تجربی فسفر خاک و کلاس همبستگی مکانی این متغیر را قوی گزارش نمود.



شکل ۲- نمودار نیم تغییرنمای همه جهته ویژگی‌های مورد مطالعه در خاک

در مورد عنصر پتاسیم نیز Weindorf and Zhu (2010) و Dalchiavon et al. (2012) مدل نمایی را برای توصیف تغییرات مکانی پتاسیم مناسب دانستند. همچنین Bogunovic et al. (2017) مدل نمایی را برای توصیف چگونگی توزیع مقادیر فسفر و پتاسیم قابل‌استفاده در خاک و همچنین ماده آلی خاک، مدل کروی برای واکنش خاک و مدل گوسی را برای داده‌های قابلیت هدایت هیدرولیکی مناسب گزارش نمودند.

همه متغیرها به‌جز آهن از وابستگی مکانی متوسط برخوردار بودند. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از پژوهش‌های Wang et al. (2009)همخوانی دارد Linnik et al. (2022) .نیز وجود همبستگی متوسط برای عناصر مس و روی را گزارش نمودند. مطالعات مختلفی مبنی بر وجود وابستگی مکانی متوسط برای پارامترهای حاصلخیزی خاک ارائه شده است (Tagore et al. 2014; Vasu et al. 2017; Sharma et al., 2021). به طور کلی می‌توان گفت تفاوت در تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و محصول گیاه به تأثیر فرآیندهای خاک‌سازی و مدیریت اراضی در هر منطقه برمی‌گردد. از سوی دیگر همبستگی مکانی، به شدت تحت اثر مقیاس در هر تحقیق بوده و در این تحقیق ویژگی‌هایی که وابستگی مکانی متوسطی دارند ممکن است در مقیاس‌های کوچک‌تر از مقیاس به کار رفته وابستگی مکانی قوی‌تری نشان دهند .(Foroughifar et al., 2011)

از طرفی در بین متغیرهای موردبررسی، منگنز بیشترین اثر قطعه‌ای را داشت (۲۰/۸۶). مقدار اثر قطعه‌ای نشان‌دهنده تغییرات تصادفی است که معمولاً از دقت اندازه‌گیری یا تغییرات خصوصیاتی که در محدوده نمونه‌گیری قابل‌تشخیص نیستند به دست می‌آید. مقادیر کم یا صفر اثر قطعه‌ای بیانگر پیوستگی مکانی بین نقاط مجاور و کوچک‌تر از فواصل نمونه‌برداری، خطاهای اندازه‌گیری و آزمایشگاهی و دیگر تغییرات غیرقابل پیش‌بینی است (آقایی پور و همکاران، ۱۳۹۷). بالا بودن اثر قطعه‌ای در واقع معیاری از نامناسب بودن فواصل نمونه‌گیری است زیرا اثر قطعه‌ای نشان‌دهنده تغییرات مکانی است که در فاصله‌های کمتر از فواصل نمونه‌گیری وجود دارد (آقایی پور و همکاران، ۱۳۹۷) .

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 است (Foroughifar et al., 2011). از بین ویژگی‌های موردمطالعه در این تحقیق، فسفر کمترین مقدار دامنه تأثیر را داشت (۳۲۷۱۰ متر) و بعد از آن پتاسیم با دامنه تأثیر ۴۳۳۰۰ متر قرار گرفت. در بررسی انجام‌گرفته توسط Sharma et al.(۲۰۲۱) نیز دامنه تأثیر برای عناصر غذایی پرمصرف فسفر و پتاسیم، بسیار کمتر از عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، روی، مس و منگنز بود. این پژوهش‌گران دلیل این امر را مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی حاوی این عناصر، بدون در نظر گرفتن نتایج آزمون خاک، بیان نمودند که منجر به بر هم خوردن تعادل در عناصر غذایی مختلف و در نتیجه حاصلخیزی خاک شده است.

مقایسه روش‌های مورداستفاده در میان‌یابی ویژگی‌های مورد مطالعه

در جدول ۴ نتایج مربوط به مناسب‌ترین تخمین‌گر جهت برآورد هر متغیر ارائه شده است. با توجه به نتایج این جدول برای متغیرهای پتاسیم، روی و منگنز روش کریجینگ معمولی و برای فسفر، مس و آهن روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان یک به عنوان بهترین روش‌های درون‌یابی شناخته شدند.

جدول ٤- نتایج ارزیابی متقابل تخمین خصوصیات موردمطالعه توسط روش‌های میان‌یابی استفاده‌شده

روش درون‌یابی	پتاسیم			فسفر			مس		
	MBE	NRMSE	R^2	MBE	NRMSE	R^2	MBE	NRMSE	R^2
کریجینگ	−۱۴/۸۵	۰/۲۹۲	۰/۴۳۱	۰/۴۳۰	۰/۴۹۴	۰/۳۱۶	−۰/۰۲۵	۰/۲۷۶	۰/۴۵۱
IDW-1	۹/۹۴	۰/۳۱۰	۰/۴۱۵	۰/۷۴۴	۰/۴۸۵	۰/۵۵۱	−۰/۰۲۵	۰/۲۷۳	۰/۴۶۱
IDW-2	۶/۶۷	۰/۳۱۴	۰/۳۱۷	۰/۵۲۷	۰/۴۶۹	۰/۴۹۰	−۰/۰۳۱	۰/۲۸۸	۰/۳۹۵
IDW-3	۳/۷۶۳	۰/۳۲۲	۰/۲۵۱	۰/۴۲۲	۰/۴۷۴	۰/۴۳۳	−۰/۰۲۷	۰/۳۱۲	۰/۳۱۸

	روی			آهن			منگنز			کربن آلی		
	MBE	NRMSE	R^2	MBE	NRMSE	R^2	MBE	NRMSE	R^2	MBE	NRMSE	R^2
کریجینگ	−۰/۰۹۰	۰/۴۶۲	۰/۴۳۱	−۰/۴۹	۰/۳۸۳	۰/۵۳۷	−۰/۴۸۲	۰/۳۸۱	۰/۴۱۴	−۰/۰۱	۰/۳۱۲	۰/۳۶۸
IDW-1	۰/۰۰۸	۰/۵۴۷	۰/۴۱۵	۰/۲۱۳	۰/۴۱۸	۰/۵۵۱	−۰/۴۷۲	۰/۳۸۳	۰/۴۰۴	۰/۱۰۰	۰/۵۳۶	۰/۳۰۴
IDW-2	−۰/۰۰۷	۰/۵۷۴	۰/۳۱۷	۰/۱۶۴	۰/۴۴۳	۰/۴۹۰	−۰/۵۰۲	۰/۴۰۲	۰/۳۳۹	۰/۱۰۵	۰/۶۳۲	۰/۳۳۹
IDW-3	−۰/۰۱۹	۰/۶۰۱	۰/۲۵۱	۰/۱۳۵	۰/۴۷۰	۰/۴۳۳	−۰/۴۹۹	۰/۴۲۱	۰/۲۹۰	۰/۱۰۹	۰/۶۳۹	۰/۳۲۰

پژوهشگران با اندازه‌گیری فسفر و پتاسیم در خاک ۳۰ مزرعه و ارزیابی روش‌هایی وزن‌دهی عکس فاصله و کریجینگ را مورد بررسی قرار دادند که نتایج برتری روش کریجینگ را نشان دادند. آن‌ها بیان کردند که بهبود تخمین‌ها به انتخاب روش درون‌یابی مطلوب

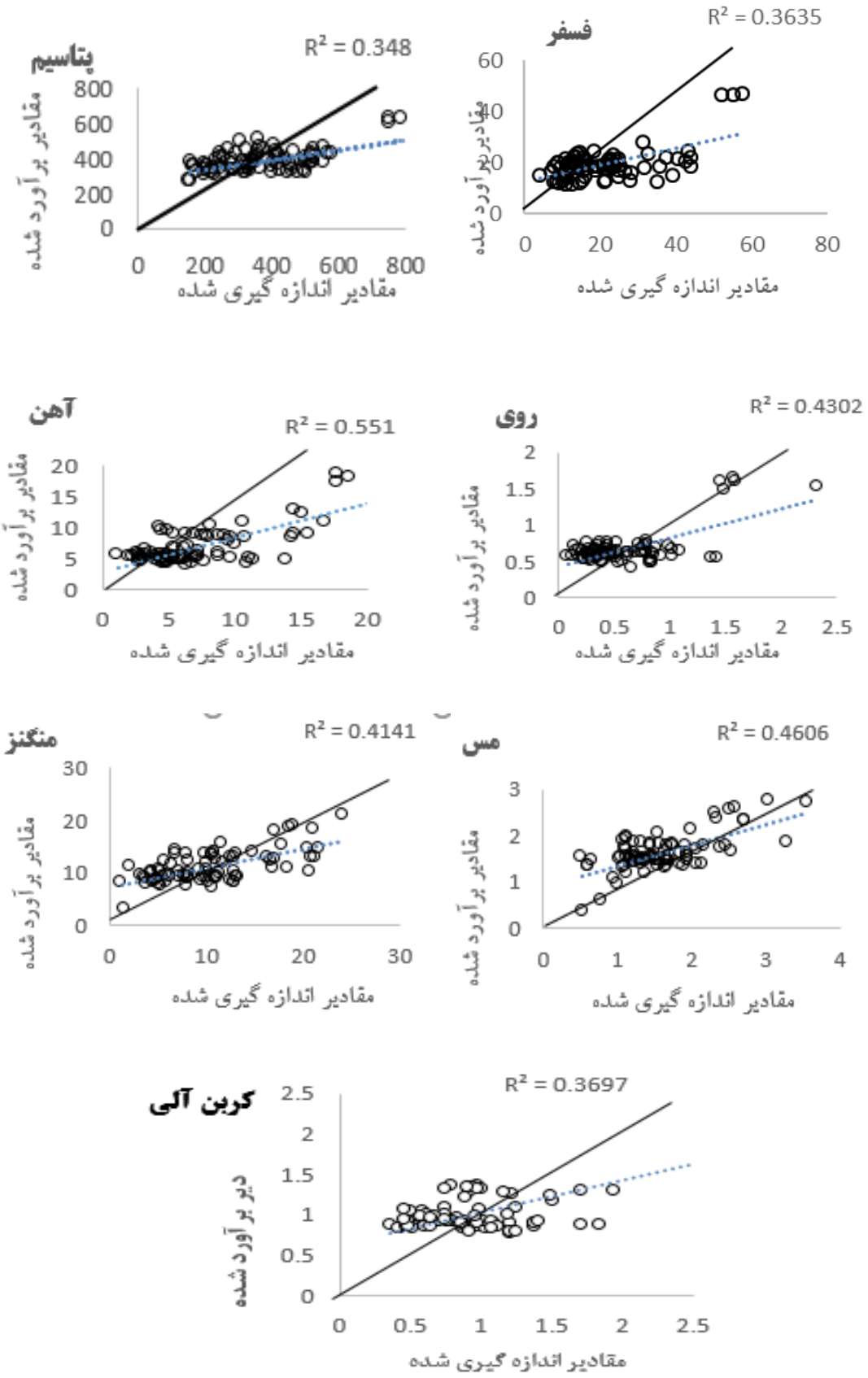
جهت به‌دست آوردن ویژگی‌های خاک در مناطق نمونه‌برداری نشده و کاربرد مناسب روش‌ها با در نظر گرفتن ماهیت و خواص داده‌ها بستگی دارد. رایج‌ترین روش‌های درون‌یابی استفاده‌شده در کشاورزی، روش وزن عکس فاصله و کریجینگ است(Kravchenko and Bullock, 1999).(Gotway et al. (1996 ارزیابی دقت روش‌های کریجینگ و وزن دهی عکس فاصله به‌منظور تهیه نقشه خاک و مواد آلی برای استفاده متغیر کودها را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که انتخاب روش درون‌یابی مناسب برای تعیین قابلیت تغییرات مکانی متغیر خاک، بر دقت نقشه‌های حاصله می‌افزاید. تخمین‌های روش کریجینگ به مقادیر بالای ضریب تغییرات حساس نبوده و روش مناسبی است.

Wollenhaupt et al. (1994) دو روش وزن دهی عکس فاصله و کریجینگ را برای تهیه نقشه فسفر و پتاسیم در دو مزرعه مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که دقت نسبی روش کریجنیگ بیشتر از روش وزن دهی عکس فاصله بود. در پژوهش‌های مختلفی ذکر شده است که در صورت استفاده از روش نمونه‌برداری مناسب و پراکنش یکنواخت نمونه‌ها در کل منطقه موردمطالعه، روش کریجینگ می‌تواند اکثر ویژگی‌های موردبررسی را با دقّت قابل قبولی برآورد کند (Chahouki et al.,2010; Jianbing et al., 2008؛ Piri sahragard and Chahouki, 2015).

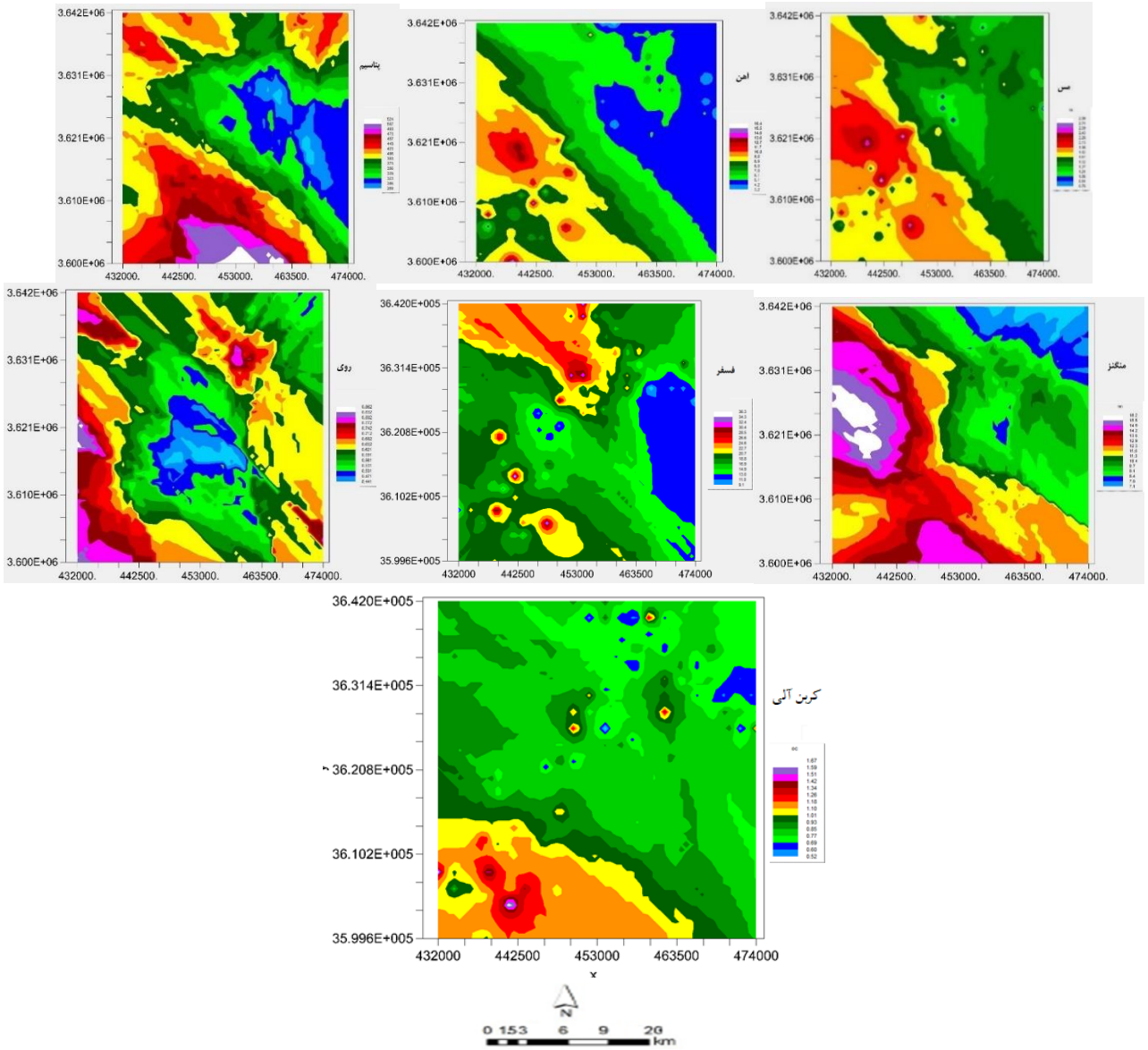
Xing-Yi et al. (2007) در شمال چین به بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک با استفاده زمین‌آمار پرداختند. نتایج نشان داد روش کریجینگ به‌طور موفقیت‌آمیزی توانسته متغیرها را با دقت بالا درون‌یابی کند. Wu et al.(2008) در مطالعه‌ای بر روی پراکنش مقدار ماده آلی در خاک‌های شمال شرق چین ثابت نمودند که روش کریجینگ معمولی می‌تواند توزیع مکانی ماده آلی خاک را به دقت برآورد کند. در مطالعه صورت گرفته توسط آقایی‌پور و همکاران (۱۳۹۷)، روش وزن‌دهی عکس فاصله در مقایسه با کریجینگ در ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، اسیدیته و سیلت دارای دقت بیشتر و خطای کمتری بود. از طرفی، اختلاف زیادی بین دو روش وزن دهی عکس فاصله و کریجینگ در ویژگی‌های قابلیت هدایت الکتریکی، رس و شن مشاهده نشد.

با توجه به مشخص شدن بهترین روش‌های درون‌یابی برای برآورد ویژگی‌های مورد مطالعه، شکل ۳ مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در برابر مقادیر برآوردشده آنها شامل کربن آلی، پتاسیم، روی و منگنز به روش کریجینگ و فسفر، مس و آهن به روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان ۱ و همچنین مقادیر ضریب تبیین را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در شکل ۳، مقادیر ضرایب تبیین برای متغیرهای موردمطالعه بین ۰/۳۴۸ تا ۰/۵۵۱ متغیر بوده است. بر اساس بررسی منابع، مقادیر ضرایب تبیین در زمینه پیش‌بینی ویژگی‌های خاک و تهیه نقشه‌های دیجیتالی معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۵ متغیر بوده و قابل‌قبول است(Patriche et al., 2023).

شکل ۴ نقشه پراکنش و پهنه‌بندی ویژگی‌های موردمطالعه بر اساس بهترین روش درون‌یابی آنها را نشان می‌دهد که شامل متغیرهای فسفر، مس و آهن، به روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان ۱ و متغیرهای پتاسیم، روی و منگنز به روش کریجینگ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ فسفر و پتاسیم و آهن قابل‌استفاده در خاک از سمت غرب به سمت مرکز و شرق روند کاهشی را دنبال می‌کند. با توجه به شکل ۴ کمترین مقادیر فسفر و پتاسیم و آهن قابل‌استفاده خاک در شرق منطقه مورد مطالعه مشاهده شد که برای فسفر در محدوده ۹ تا ۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (رنگ آبی بر روی نقشه) قرار داشت و برای این نواحی نیاز به مصرف کودهای فسفره در خاک خواهد بود که میزان آن بسته به نوع محصول و نیاز گیاه مورد کشت متفاوت خواهد بود. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری‌شده و درون‌یابی‌شده نقشه پهنه‌بندی برای پتاسیم و نیز نقشه پهنه‌بندی (شکل۴)، میزان پتاسیم در بیشتر نقاط منطقه موردمطالعه بین ۲۸۹ تا ۴۷۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک متغیر بوده و تنها در نقاط بسیار کوچکی در جنوب منطقه بین ۴۹۰ تا ۵۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک قرار دارد. با توجه به حد کفایت پتاسیم در خاک که در حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تعریف شده است (جدول۲)، نیازی به مصرف کودهای پتاسیمی در منطقه وجود ندارد. با توجه به حد کفایت تعریف‌شده برای آهن (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، جدول۲)، تنها نقاطی که بر روی نقشه مربوط به این متغیر به رنگ نارنجی و قرمز هستند (در غرب منطقه مورد مطالعه)، در حد کفایت بوده که در محدوده‌ای بین ۱۱/۷ تا ۱۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار گرفته است و در سایر مناطق نیاز به مصرف کودهای حاوی آهن است که بسته به نوع محصول و مدیریت مزرعه به‌صورت محلول‌پاشی با کلات‌های آهن و یا کودآبیاری توصیه می‌شود.



شکل ۳- مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در برابر مقادیر برآوردشده آنها با روش‌های مختلف درون‌یابی: پتاسیم، روی و منگنز به روش کریجینگ و فسفر، آهن و مس به روش IDW-1



شکل ٤- نقشه پراکنش ویژگی‌های موردمطالعه بر اساس بهترین روش درون‌یابی آنها: فسفر، آهن، مس به روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان ۱ و پتاسیم، ماده آلی، روی و منگنز به روش کریجینگ

در مورد مس قابل‌استفاده خاک با وجود روند کاهشی از غرب به شرق منطقه، با توجه به حد کفایت این عنصر (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) نیازی به مصرف کود در این رابطه نیست. کمبود خفیف منگنز تنها قسمت بسیار کوچکی در شمال شرق منطقه مشاهده شد (بین ۷ تا ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و در سایر مناطق در بالاتر از حد کفایت (۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) قرار داشته که بین ۸/۵ تا ۱۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر بود. میزان روی اندازه‌گیری‌شده در منطقه در محدوده بین ۰/۴۴تا ۰/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر بود که پایین‌تر از حد کفایت این عنصر در خاک بوده و نیاز به مصرف کودهای حاوی این عنصر به شدت در منطقه وجود دارد. میزان ماده آلی خاک در منطقه عمدتاً بین ۰/۶ تا یک درصد بوده است (رنگ سبز در نقشه کربن آلی، شکل۳) و در قسمت کوچکی از جنوب و غرب منطقه میزان ماده آلی تا ۱/۳ درصد افزایش داشته است. بنابراین به‌طور کلی مصرف کودهای آلی به‌ویژه کودهای دامی برای افزایش حاصلخیزی خاک قابل توصیه است. با توجه به رابطه بین کربن آلی و نیتروژن موجود در خاک مصرف کودهای نیتروژنه در خاک ضروری است. بر اساس نتایج به نظر می‌رسد وضعیت حاصلخیزی خاک در نواحی غرب و جنوب غرب منطقه موردمطالعه بهتر است.

نتیجه‌گیری

ارزیابی تنوع مکانی و پهنه‌بندی ویژگی‌های مختلف خاک پیش‌نیاز مهم کشاورزی دقیق است. آگاهی از ساختار وابستگی مکانی و پهنه‌بندی

عناصر غذایی قابل‌استفاده گیاه در خاک کمک قابل ملاحظه‌ای در مصرف بهینه کود در خاک خواهد بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کلیه متغیرهای موردبررسی شامل ماده آلی، پتاسیم، فسفر، مس، روی، منگنز و آهن قابل‌استفاده خاک از همبستگی مکانی متوسطی در سطح منطقه برخوردار بودند که این امر نشان‌دهنده تأثیر بیشتر عوامل مدیریتی از قبیل کوددهی، سیستم آبیاری و کشت و کار و ... بر تغییرات این ویژگی‌ها در خاک است. بهترین مدل ساختار مکانی برای متغیرهای ماده آلی، فسفر، پتاسیم و روی مدل نمایی و برای آهن، مس و منگنز مدل کروی بود. بر اساس نتایج، برای متغیرهای فسفر، مس و آهن روش وزن‌دهی عکس فاصله با توان ۱ و برای سایر متغیرها روش کریجینگ معمولی به‌عنوان بهترین روش‌های درون‌یابی شناخته شدند. چگونگی پراکنش ویژگی‌های موردمطالعه و نقشه‌های پهنه‌بندی نشان داد که وضعیت حاصلخیزی خاک در قسمت‌های جنوبی و غربی منطقه موردمطالعه بهتر بوده و با پیشروی به سمت نواحی مرکزی و شرق میزان عناصر غذایی خاک کاهش پیدا کرد. در کل، منطقه از نظر عناصر غذایی پتاسیم، مس و منگنز در حد کفایت بوده و در سایر موارد مصرف کود و مواد آلی برای افزایش حاصلخیزی خاک ضروری است. در مجموع از نتایج این پژوهش می‌توان برای تخمین وضعیت حاصلخیزی در زمین‌های تحت کشت در منطقه موردمطالعه در راستای مدیریت مناسب کودی و در نتیجه بهبود عملکرد بهره برد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

آقایی پور، نیلوفر؛ پیردشتی، همت اله؛ زواره، محسن؛ اسدی، حسین و بهمنیار، محمد. علی. (۱۳۹۷). ارزیابی تغییرپذیری مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک در شالیزارهای دشت فومنات با استفاده از زمین‌آمار. *نشریه پژوهش‌های کاربردی زراعی دوره*، ۳۱(۴) ،۷۱-۵۰ .

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 زمین‌آمار (مطالعه موردی: مسیر زابل به زاهدان). مجله محیطزیست و مهندسی آب، (۳) ۵، ۲۶۳-۲۵۱.

پورتال سازمان جهاد کشاورزی شهرستان چادگان، https://chadegan.agri-es.ir/Default.aspx?tabid=7687

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 آب و خاک، ۲۱-۲،۲۱(۳)، ۲۱-۱.

محمدی، جهانگیر. (۱۳۸۵). پدومتری (آمار مکانی). نشر پلک. ص ۴۵۴.

ملکوتی، محمدجعفر؛ مولوی، صفدر؛ غیبی، محمدنبی و مشیری، فرهاد. (۱۳۸۴). حد مطلوب غلظت عناصر غذایی در خاک و برخی از محصولات زراعی و باغی (بخش دوم: محصولات باغی). موسسه تحقیقات خاک و آب. ۴۰۶. ص ۲۱.

REFERENCES

Aghaeipour, N., Zavareh, M., Pirdashti, H., Asadi, H. & Bahmanyar, M.A. (2017). Evaluation of spatial variability of some soil chemical and physical properties in Foumanat Plain paddies using geostatistical methods. Applied Research in Field Crops. 31(4), 50-71 (in Persian).

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. Environental Water Enginiering, 5(3), 251–263. DOI: 10.22034/jewe.2019.200821.1330. (in Persian).

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(2): 35-46.

Bogunovic, I., Paulo Pereira, P. & Brevik, C. (2017). Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. Science of the Total Environment, 584–58, 535-545.

Chahouki, M.A., Ernani, M., Zare Chahouki, A. & Khalasi Ahvazi, L. (2010). Application of spatial statistical methods in predictive models of plant species habitat. Journal of Arid Biom Scientific and Research, 1(1), 13-23.

Dalchiavon, F. C., Carvalho, M. P., Andreotti, M. & Montanari, R. (2012). Spatial variability of the fertility attributes of dystropheric red latosol under a no-tillage system. Journal of Revista Ciencia Agronomice. 43, 453-461.

Desavathu, R.P., Nadipena, A.R. & Peddada, J.R. (2017). Assessment of soil fertility status in Paderu Mandal, Visakhapatnam district of Andhra Pradesh through geospatial techniques. Egyptian Journal of Remote

Sensing and Space Science, 21. doi:10.1016/j.ejrs.2017.01.006.

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 lowa soils. Soil Science Society of America Journal, 58, 1501-1511.

Foroughifar, H., Jafarzadah, A. A., Torabi Gelsefidi, H., Aliasgharzadah, N., Toomanian, N. & Davatgar, N. (2011). Spatial Variations of Surface Soil Physical and Chemical Properties on Different Landforms of Tabriz Plain. Soil and water science, 21 (3), 1-21. (In persion).

Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Herget, G. W. & Peterson, T. A. (1996). Comparison of kriging and Inverse-Distance methods for mapping soil parameters. Soil Science Society of America Journal, 60, 1237-1247.

Hashemi, M.., Gholamalizadeh Ahangar, A., Bameri, A., Sarani, F. & Hejazizadeh, A. (2016). Survey and zoning of soil physical and chemical properties using Geostatistical methods in GIS (Case study: Miankangi region in Sistan. Water Soil, 30(2), 443-458.

Hu, K., Zhang, F., Li H., Huang, F. & Li, B. G. (2006). Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing. Pedosphere, 16, 690-698.

Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. NewYork. P. 561.

Jaiver, D., Sanchez, T., Gustavo, A., Ligarreto, M. & Fabio, R. L. (2011). Spatial variability of soil chemical properties and its effect on crop yield. A case study in maize (zea mays L.) on the Bogota plateau. Journal of Agronomia colombiana. 29, 265- 274.

Jianbing, W., Boucher, A. & Zhang, T. (2008). A SGeMS code for pattern simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM. Computers & Geosciences, 4(12), 1863-1876.

Karimi Nezhad, M. T., Tabatabaii, S. M. & Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iranian Journak of Geochemical Exploration, 152, 91-109.

Kravchenko, A. & Bullock, D.G. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. Agronomy Journal, 91, 393–400.

Linnik, V., Tatiana, G., Bauer, V., Tatiana, M., Saglara, S. & Mazarji, M. (2022). Spatial distribution of heavy metals in soils of the flood plain of the Seversky Donets River (Russia) based on geostatistical methods. Environ Geochem Health , 44, 319–333. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00688-y

Liu, R., Xu, F., Yu, W., Shi, J., Zhang, P. & Shen, Z. (2016). Analysis of field-scale spatial correlations and variations of soil nutrients using geostatistics. Journal of Environmental Monitoring and Assessment. 188 (2):1–10.

Malakouti, M. j., Moshiri, F., Ghaibi, M.N. & Molavi, s. (2005). Optimum levels of some nutrients in soils and some agronomic and horticultural. Part2:Horticultural crops. Ministry of Jihad-e-Agriculture. Soil and Water Institute.406. 21p. (In Persian).

Mohammadi, J. (2006). Pedometrics (spatial statistics). Pelk Publication. Tehran, 453p (In Persian).

Mulder, V.L., Lacoste, M., Richer-de-Forxges, A.C. & Arrouays, D. (2016). Global Soil Map.France: high resolution spatial modelling the soils of France up to two meter depth Advances in Soil Science, 573 (1),1352–1369.

Najafian, A., Dayani, M., Motaghian, H. & Nadian, H. (2012). Geostatistical assessment of the spatial distribution of some chemical properties in calcareous soils. Journal of Integrative Agriculture, 11, 1729-1737.

Nourzadeh, M., Mahdian, M. H. & Malakouti, M. J. (2010). Investigation and prediction spatial variability in chemical of agricultural soil using geostatistics. Archives of Agronomy and Soil Science, 1-15.

Olsen, S. R. & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. PP. 403-430. In: A. L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis, Agron. No. 9, Part 2, Chemical and microbiological properties, 2nd ed., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, 403-430.

Page, A.L., R. H. Miller and and M. Keeney. 1992. Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. In Soil Science Society of America, Vol. 1159.

Patriche, C.V., Roşca, B., Pıˆrnău, R.G. & Vasiliniuc, I. (2023) Spatial modelling of topsoil properties in Romania using geostatistical methods and machine learning. PLoS ONE, 18(8).
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289286

Piri sahragard, H. & Zare Chahouki, M.A. (2015). An evaluation of predictive habitat models performance of plant species in Hoze soltan rangelands of Qom province. Ecological Modelling, 309,310: 64-71.

Portal of Jihad-e-Agriculture organization of Chadegan city. *https://chadegan.agri-es.ir/Default.aspx?tabid=7687* (In Persian).

Qiu, W., Curtin, D. & Beare, M. (2011). Spatial variability of available nutrients and soil carbon under arable cropping in Canterbury. The New Zealand Institute for plant and food research limited. 7 pp.

Reza, S.K., Ray, S.K., Nayak, D.C & Singh, S.K. (2018). Geostatistical and multivariate analysis of heavy metal pollution of coal-mine affected agricultural soils of North-eastern India. Journal of the Indian Society of Soil Science, 66(1), 20–27. doi:10.5958/0974-0228.2018.00003.8.

Rezazadehshamkhal, S., Gholamalizadeh Ahangar, A., Gazmeh, S., Froghifar, H. and Bameri, A. 2016. Evaluation of Different Interpolation Methods in Spatial Estimation of Soil Properties in Sistan Plain. Water and soil science, 26 (2), 151-162.

Rizwan, M., Siddique, M. T., Ahmed, H., Iqbal, M. & Ziad T. (2016). Spatial variability of selected physico-chemical properties and macronutrients in the shale and sandstone derived soils. Soil Environment, 35(1), 12-21.

Sharma, B. D., Aggarwal, V. K., Mukhopadhayay, S. S. & Arora, H. 2002. Micronutrient distribution and their association whit soil properties in Entisol of Punjab, India. Journal of Agricultural, 7, 315-322

Sharma, R. P., Chattaraj, S., Vasu, D., Karthikeyan, K., Tiwary, P., Naitam, R. K. & Nimkar, A. M.
(2021) Spatial variability assessment of soil fertility in black soils of central India using geostatistical modeling. Archives of Agronomy and Soil Science, 67, 7, 876-888.

Tagore, G.S., Bairagi, G.D., Sharma, R. & Verma, P.K. (2014). Spatial variability of soil nutrients using geospatial techniques: A case study in soils of Sanwer Tehsil of Indore district of Madhya Pradesh. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 8,1353–1363. doi:10.5194/isprsarchives-XL-8-1353-2014.

Utset, A., Lopez, T. & Diaz, M. (2000). A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially prediction bulk density and field capacity of Ferralsols in the Havana-Matanaz Plain. Geoderma, 96, 199-213.

Vasu, D., Singh, S.K., Sahu, N., Tiwary, P., Chandran, P., Duraisami, V.P., Ramamurthy, V., Lalitha, M. & Kalaiselvi, B. (2017). Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. Soil Tillage Researches. 169, 25–34. doi:10.1016/j.still.2017.01.006.

Vieira, S.R. & Gonzalez, A. (2003). Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. Bragantia, 62,127-138.

Wang, Y., Zhang, X. and Huang, C. (2009). Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. Geoderma, 150, 141-149

Weindorf, D. C. & Zhu, Y. (2010). Spatial Variability of Soil Properties at Capulin Volcano, New Mexico. USA. Journal of Soil Science Society of China, 20, 185–197.

Wollenhaupt, N. C., Wolkowski, R. P. & Clayton, M. K. (1994). Mapping soil test phosphorus and potassium for variable rate fertilizer application. Journal of Production Agriculture, 7, 441-448.

Wu, W., Xiu, D. T. & Liu, H. B. (2008). Spatial variability of soil heavy metals in the three gorges area, Multivariate and Geostatistical analysi. Journal of Environmental Mointoring 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. 2

Zhang, X., Lin, F., Jiang, Y., Wang, K. & Feng, X. L. (2008). Variability of total and available copper concentrations in relation to land use and soil properties in Yangtz river deltabof China. Journal of Environmental Monitoring and Assessment ,

Zheng, J., He, M., Li, X., Chen, Y., Li, X. & Liu, L. (2008). Effect of Salsola passerine shrub patches on the micro scale heterogeneity of soil in a mountain grassland, China Journal of Arid Environment, 72, 150-161.

Zulfikar Khan, M., Rafikul Islam, M., Abdus Salam, B. & Ray, TY. (2021). Spatial Variability and Geostatistical Analysis of Soil Properties in the Diversified Cropping Regions of Bangladesh Using Geographic Information System Techniques. Applied and Environmental Soil Science, 1-19. https://doi.org/10.1155/2021/6639180.

Spatial variability assessment of some soil nutrient elements using geostatistical methods (Case study: Chadegan, Isfahan province)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The existence of spatial variability in soil properties entails site-specific management for balanced plant nutrition towards achieving sustainable crop production which is the epitome of precision agriculture. In this respect, the application of geostatistical techniques is becoming standard for input-based crop production. spatial variability mapping is an efficient geospatial tool and technique for the diagnosis of nutrient-related limitations and their management. The aim of this study was to evaluate the spatial variability and frequency distribution of some soil nutrient elements, including organic carbon, soil-available phosphorus, potassium, zinc, copper, manganese, and iron.

Methods

The study was conducted on 84 soil samples, in agricultural lands of Chadegan (Isfahan province). The spatial correlation of each variable with a specific semi-variable and the best fitting model for each variable were selected using GS+ version 9 software. Interpolation was done using normal Kriging and Inverse Distance Weighting with powers of 1 to 3 methods. The accuracy of the distribution maps of these variables was evaluated by the Mean bias error (MBE) the standard root mean square error (NRMSE), and the coefficient of determination (R2).

Results and Discussion

The results of the geostatistical analysis showed that all studied properties including organic carbon, soil-available phosphorus, potassium, zinc, copper, manganese and iron had moderate spatial dependence. The moderate spatial dependence could result from variation in environmental factors such as flood water, irrigation, fertilizers addition, high water table level or agriculture practices, and different agricultural managements. The exponential model was the most accurate to predict organic carbon, phosphorus, potassium and zink variables while iron, copper, and manganese were best fitted with an spherical model. Also, among the studied characteristics, organic carbon, phosphorus, and potassium had the smallest effective range respectively. For phosphorus, iron, and copper variables, the Inverse Distance Weighting with the power of 1 (IDW-1) and for organic carbon, potassium, zinc, and manganese normal kriging methods were recognized as the best interpolation methods. Spatial distribution maps according to the most accurate techniques showed that the greatest soil nutrient elements were measured in the west and the north parts. This means that the soil fertility condition was better in the southern and western parts of the study area, and the amount of nutrients in the soil decreased towards the central and eastern areas. In addition to management factors such as fertilization and irrigation, this is due to the climate and more rainfall in these areas, as well as the higher quality of irrigation water in these areas. In general, according to the obtained results, it was found that geostatistical modeling can show continuous changes in soil parameters with acceptable accuracy. Therefore, these results could help to adopt methods for crop improvement including proper crop choice and site-specific fertilizer recommendations to optimize the management of inputs and sustainable production.

Keywords: GS+ Software, Semi-Variable, Soil Fertility Spatial Distribution.