

Evaluation of Ordinary Kriging and Cokriging Geostatistical Methods for Spatial Analysis and Mapping of Soil Hydraulic Properties

Parisa Mashayekhi^{1*}, Mohsen Dehghani²

(Received: January, 2025

Accepted: June, 2025)

Abstract

In recent years, geostatistical methods have become powerful tools for spatial analysis of soil properties. This study evaluated and compared two geostatistical methods, Kriging and Co-kriging, to estimate soil moisture at field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) using 101 soil samples collected from various regions of Isfahan province, Iran. Soil samples were randomly collected from a depth of 0 to 30 cm in the target areas, and soil texture, FC, and PWP properties were measured. GS+ version 9 software was used to examine and describe the structure of the studied properties, and ArcGIS software was used to create zoning maps. The accuracy of the estimated values was assessed using mean bias error (MBE) and root mean square error (RMSE). Pearson correlation analysis revealed strong correlations between clay, silt, sand percentages, bulk density, and organic matter percentage with FC (0.84, 0.81, -0.92, 0.60, and 0.55, respectively) and PWP (0.83, 0.78, -0.90, -0.54, and 0.54, respectively). Geostatistical analysis indicated that the spherical model provided the best fit for all measured variables and that all variables exhibited strong spatial dependence (sill to nugget plus sill ratio was less than 25%). Statistical comparisons showed that ordinary Kriging outperformed Co-kriging in estimating FC and PWP. The coefficients of determination (R^2) for FC values in ordinary Kriging, Co-kriging with clay as auxiliary data, Co-kriging with silt as auxiliary data, and Co-kriging with organic matter as auxiliary data were 0.66, 0.62, 0.60, and 0.61, respectively, while for PWP values, they were 0.68, 0.67, 0.67, and 0.66, respectively. Therefore, ordinary Kriging, due to its simplicity and computational efficiency, can be a viable method for estimating FC and PWP with acceptable accuracy.

Key words: Field capacity, Interpolation, Semi-variable, Spatial dependence, Wilting point

Mashayekhi P., Dehghani M., 2025. Evaluation of ordinary kriging and cokriging geostatistical methods for spatial analysis and mapping of soil hydraulic properties. *Applied Soil Research*. 13(3): 63-78.

1 & 2. Assistant professor, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

* Corresponding Author Email: Mashayekhi_enj@yahoo.com

ارزیابی روش‌های زمین‌آماري کريجينگ معمولي و کوكريجينگ در تحليل و پهنه‌بندی مكاني برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

پریسا مشایخی^{۱*}، محسن دهقانی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱)

چکیده

روش‌های زمین‌آماري درسال‌های اخیر به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای تحلیل مکانی ویژگی‌های خاک مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف مقایسه دو روش زمین‌آماري کريجينگ و کوكريجينگ در برآورد میزان رطوبت خاک در نقاط ظرفیت مزرعه (FC) و پژمردگی دائم گیاه (PWP) بر روی ۱۰۱ نمونه خاک از مناطق مختلف استان اصفهان انجام شد. نمونه‌های خاک به صورت تصادفی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتری مناطق مورد نظر برداشت شد و ویژگی‌های بافت، FC و PWP مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای بررسی و تشریح ساختار ویژگی‌های مورد مطالعه از نرم‌افزار GS+ نسخه ۹ و برای ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. میزان دقت مقادیر برآورد شده این متغیرها به کمک معیارهای آماری میانگین انحراف خطا و ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. آنالیز همبستگی پیرسون ضرایب همبستگی بالا بین درصد ذرات رس، سیلت، شن، وزن مخصوص ظاهری و مواد آلی با مقادیر FC به ترتیب معادل ۰/۸۴، ۰/۸۱، ۰/۹۲، ۰/۶۰ و ۰/۵۵ و با PWP به ترتیب معادل ۰/۸۳، ۰/۷۸، ۰/۹۰، ۰/۵۴ و ۰/۵۴ بود. نتایج آنالیز زمین‌آماري نشان داد که برای تمام ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده، مدل کروی بیشترین انطباق را با نیم‌تغییرنماهای تجربی محاسبه‌شده داشته است. تمامی متغیرهای مورد مطالعه به جز درصد کربن آلی از ساختار مکانی قوی برخوردار بودند. با توجه به نتایج، روش کريجينگ از دقت بالاتری در برآورد FC و PWP نسبت به کوكريجينگ برخوردار بود. مقادیر ضرایب تعیین برای مقادیر FC در روش‌های کريجينگ، کوكريجينگ (داده کمکی رس)، کوكريجينگ (داده کمکی سیلت) و کوكريجينگ (داده کمکی کربن آلی) به ترتیب معادل ۰/۶۶، ۰/۶۲، ۰/۶۰ و ۰/۶۱ و برای مقادیر PWP به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۶، ۰/۶۷ و ۰/۶۶ بود؛ بنابراین روش کريجينگ معمولی به‌ویژه به دلیل سهولت و سرعت عمل بیشتر نسبت به روش کوكريجينگ، می‌تواند روش سودمندی در تخمین مقادیر FC و PWP با دقت قابل قبول باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر نما، درونیابی، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، وابستگی مکانی

مشایخی پ.، دهقانی م. ۱۴۰۴. ارزیابی روش‌های زمین‌آماري کريجينگ معمولی و کوكريجينگ در تحلیل و پهنه‌بندی مکانی برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۳، شماره ۳. صفحه: ۶۳-۷۸.

۱ و ۲- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

* پست الکترونیک: Mashayekhi_enj@yahoo.com

مقدمه

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل منحنی‌های نگهداشت آب خاک و هدایت هیدرولیکی با تأثیر بر نفوذ آب به خاک، نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب در اراضی کشاورزی و حوضه‌های آبخیز دارند. همچنین، برای مدل‌سازی حرکت آب در خاک، اطلاع دقیق از چگونگی تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، بسیار ضروری است (Wang et al., 2020).

تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک از جنبه‌های مختلفی دارای اهمیت است که از جمله آنها می‌توان به تعیین میزان نگهداشت آب توسط خاک، برای گیاهان، تعیین میزان رطوبت خاک در مکش‌های مختلف، توزیع اندازه منافذ خاک در شرایط خاک‌های غیر منبسط‌شونده اشاره کرد. وضعیت رطوبتی خاک مزرعه را می‌توان با استفاده از منحنی رطوبتی خاک تعیین و میزان آب قابل‌استفاده گیاه را مشخص کرد. میزان رطوبت موجود در ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم گیاه از جمله نقاط بسیار مهم در منحنی مشخصه رطوبتی خاک هستند. مقادیر رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم گیاه از پرکاربردترین ویژگی‌ها برای برنامه‌ریزی و طراحی سامانه‌های مختلف آبیاری، برآورد آب قابل دسترس گیاه و تعیین عمق آبیاری برای زراعت و مدیریت زراعی به شمار می‌آیند (Amsili et al., 2024). از سوی دیگر این دو نقطه از منحنی رطوبتی متغیرهای ورودی مهمی در طیف گسترده‌ای از مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی هستند (Qiao et al., 2018). معمول‌ترین روش تعیین این ویژگی‌ها، روش مستقیم اندازه‌گیری آنها در آزمایشگاه است که به‌طور عمده توسط دستگاه صفحات فشاری انجام می‌پذیرد. استفاده از این روش بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است؛ ضمن این که این به علت تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (Asgarzadeh et al., 2014). اگر ناحیه تحت مطالعه به نسبت کوچک و یا اینکه به اندازه کافی از لحاظ ویژگی‌های فیزیکی خاک همگن باشد، می‌توان با انجام تعداد قابل قبولی از آزمایش‌های مزرعه‌ای تقریب‌های خوبی از میزان رطوبت در این نقاط به عمل آورد. اما اگر ناحیه مورد مطالعه وسیع باشد به طوری که تغییرات مکانی قابل توجهی در خصوصیات هیدرولیکی خاک مشاهده گردد، تقریباً غیرممکن است بتوان تعداد آزمایش‌ها را به گونه‌ای

تنظیم کرد که علاوه بر این که تقریب خوبی از میزان رطوبت در نقاط مذکور به دست می‌آید، محدودیت‌های مادی و زمانی انجام پروژه نیز رعایت شده باشد (Castellini et al., 2020). از سوی دیگر با توجه به ناهمگونی بسیار بالای ویژگی‌های خاک به‌خصوص ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک مدیریت مزرعه بر اساس مجموعه‌ای از نقاط گسسته نمونه‌برداری، امکان‌پذیر نبوده و بایستی این داده‌ها در قالبی پیوسته از اطلاعات تبدیل گردند. روش‌های زمین‌آماري تقریباً ۳۰ سال است که برای درون‌یابی مکانی ویژگی‌های خاک به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده شده‌اند (Yang et al., 2016; Seyed Jalali et al., 2019).

در زمین‌آمار، برای بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های مختلف در یک منطقه از تغییرنا استفاده می‌شود. تغییرنا 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 (Duarte et al., 2021).

در بین انواع تخمین‌گرهای زمین‌آماري، روش کریجینگ معمولی به لحاظ سهولت و سرعت عمل بالا، از شهرت بیشتری برخوردار است. این روش برای تخمین ویژگی‌های مختلف در نقاط نمونه‌برداری نشده، از مقادیر اندازه‌گیری شده همسایه وزنی آن نقطه استفاده می‌کند (Erdogan et al., 2022). از طرف دیگر نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از متغیرهای کمکی یا ثانویه موجود (در صورت داشتن همبستگی خوب با متغیر اولیه) در روش‌های زمین‌آماري چند متغیره مانند کوکریجینگ می‌تواند باعث افزایش دقت تخمین متغیر اولیه گردد. هدف از استفاده از روش‌های زمین‌آماري چند متغیره برای پیش‌بینی، به دست آوردن عملکرد برتر با استفاده از اطلاعات اضافی از فرآیندهای مکانی است که با یکدیگر همبستگی دارند (Delbari & Jahani, 2014). لیم و وو (Lim & Wu, 2021) دریافتند که کوکریجینگ از نظر خطای پیش‌بینی، زمانی بهتر است که یک فرآیند دوم بسیار همبسته در مکان‌های با فواصل کمتر، با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های واقعی در دسترس باشد.

باراسان و همکاران (Basaran et al., 2011) در بررسی چگونگی توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از دو روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ به این نتیجه رسیدند که کوکریجینگ در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی

خاک نسبت به کریجینگ برتری دارد. در مطالعه آنها، ویژگی پایداری خاکدانه به طور قابل توجهی با هدایت هیدرولیکی خاک مرتبط بود و بنابراین از آن به عنوان یک متغیر کمکی برای تخمین هدایت هیدرولیکی خاک استفاده شد. همچنین حسینی (Hoseini, 2024) در ارزیابی روش های زمین آماری در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک، به این نتیجه رسید که استفاده از متغیر کمکی درصد رس تا حد زیادی دقت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را افزایش داده و از این رو روش کوکریجینگ را موفق تر از روش کریجینگ معمولی در برآورد این ویژگی خاک معرفی نمودند. به همین صورت یانگ و همکاران (Yang et al., 2016) دریافتند که استفاده از چگالی ظاهری خاک به عنوان متغیر اولیه و محتوای آب خاک به عنوان متغیر کمکی با کمک روش درون یابی کوکریجینگ، نتیجه را تا ۴۵/۵ درصد در مقایسه با کریجینگ بهبود بخشید. در پژوهش انجام شده توسط افزلی و همکاران (Afzali et al., 2018) به منظور نمایش تغییرات مکانی بافت خاک، از روش کریجینگ استفاده شد. با توجه به نتایج شاخص های ارزیابی، مدل کریجینگ از کارایی قابل قبولی در پهنه بندی تغییرات خصوصیات فیزیکی خاک برخوردار بود. از طرفی شدت همبستگی مکانی بالا بود و در همه مدل ها کمتر از ۰/۲۵ به دست آمد. در بررسی تغییرات مکانی ویژگی های شوری و سدیمی خاک های منطقه چات در استان گلستان، روش کریجینگ معمولی در مجموع از دقت بالاتری نسبت به سایر روش ها در برآورد ویژگی های مورد مطالعه برخوردار بود (Delbari & Jahani, 2014). رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2024) از روش زمین آمار برای تعیین واحدهای مدیریت حاصلخیزی خاک برای تولید گندم استفاده نمودند. به عقیده این پژوهشگران، داشتن درک مناسبی از توزیع مکانی ویژگی های مختلف خاک و نقشه برداری آنها، کلید مدیریت ویژه مکانی خاک برای تولید پایدار محصول خواهد بود. در این مطالعه ویژگی های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک شامل هدایت الکتریکی، اسیدیته، کربن آلی و درصد عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف موجود در خاک با استفاده از روش کریجینگ با دقت قابل قبولی برآورد و برای تعیین و تفکیک واحدهای اراضی منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد.

وان و همکاران (Wan et al., 2024) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) نشان دادند که روش کوکریجینگ در برخی شرایط هیچ ارجحیتی نسبت به روش کریجینگ در برآورد ویژگی های خاک ندارد. بنابراین در مواردی که هدف تنها ارائه یک تصویر کلی از شکل توزیع مکانی یک ویژگی در سطح منطقه همراه با عدم قطعیت سطح برآورد شده است، روش کریجینگ معمولی که از سهولت و سرعت عمل بیشتری نسبت به سایر روش های زمین آماری برخوردار است، می تواند روش سودمندی باشد. بنا بر آنچه گفته شد پژوهش های مختلفی در خصوص روش های مختلف زمین آماری در برآورد توزیع مکانی ویژگی های مختلف خاک انجام شده است. برخی از این پژوهش ها ارجحیت روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ را نشان می دهد در حالی که برخی دیگر نتایجی متفاوت را به دنبال داشته است.

این پژوهش با هدف بهبود مدیریت پایدار منابع آب در استان اصفهان، به ارزیابی و مقایسه کارایی روش های کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد دقیق رطوبت خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم به عنوان دو نقطه مهم از منحنی مشخصه رطوبتی خاک انجام شد.

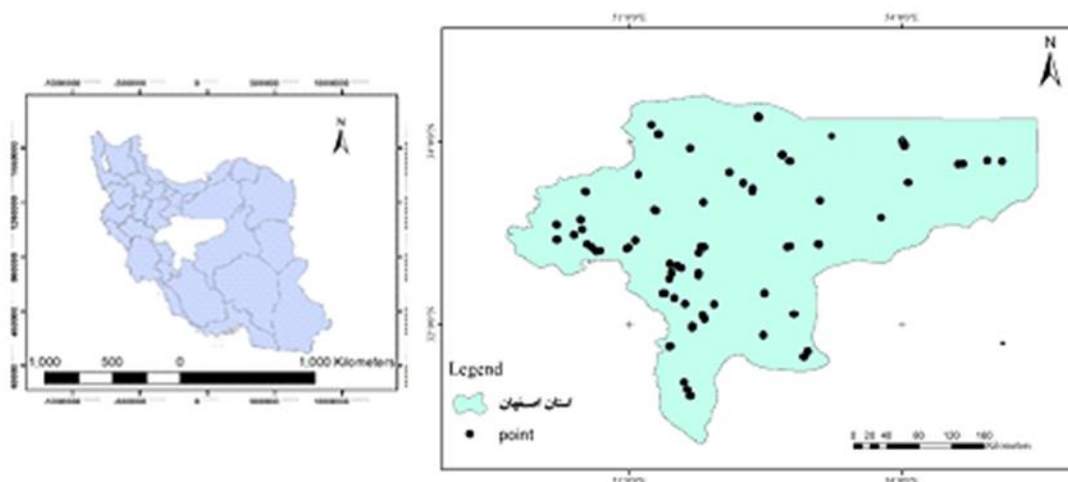
مواد و روش ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش از داده های مربوط به ویژگی های مختلف فیزیکی و هیدرولیکی اندازه گیری شده در ۱۰۱ نقطه از زمین های زراعی آبی استان اصفهان در سال ۱۳۹۷ استفاده شد. استان اصفهان با مساحتی حدود ۱۰۶۷۸۶ کیلومتر مربع بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی، واقع شده است. برای تعیین نقاط نمونه برداری، از اطلاعات موجود مختلفی نظیر نوع کاربری اراضی، نقشه رقومی استان، نقشه رقومی کاربری اراضی، نقشه رقومی خاک و اطلاعات و نظر کارشناسان مطلع از وضعیت کشت و خاک منطقه مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به پراکندگی اراضی زیر کشت در بسیاری از مناطق استان، انجام شبکه بندی جهت انتخاب پایگاه های مطالعاتی نمی توانست همه اراضی و مناطق تحت کشت را پوشش دهد؛ لذا نقاط نمونه برداری به گونه ای انتخاب شد که تقریباً در هر ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ هکتار سطح زیر کشت در استان یک

(BD) به روش نمونه برداری با سیلندر با ارتفاع ۴ و قطر ۳/۵ سانتی متر، FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در مکش های ۳۳۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی متر (Klute, 1986)، کربن آلی (OC) به روش والکلی و بلک (Walkley & Black, 1934) و کربنات کلسیم معادل (TNV) به روش تیتراسیون برگشتی (Klute, 1986) بود.

نمونه از مزارع شاخص هر منطقه تهیه گردد. پس از انتخاب پایگاه های مطالعاتی و ثبت موقعیت جغرافیایی آن، نمونه برداری به صورت مرکب از عمق ۳۰-۰ سانتی متر انجام گرفت. موقعیت نقاط نمونه برداری شده در شکل ۱ مشخص شده است. نمونه های خاک مورد اندازه گیری مربوط به عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری بوده و ویژگی های اندازه گیری شده شامل بافت خاک به روش هیدرومتری، چگالی ظاهری



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه برداری در منطقه مطالعاتی استان اصفهان
Figure 1. Location of sampling points in the study area of Isfahan province

نیم تغییرنا در حقیقت سنچسگر میانگین عدم شباهت داده ها در دو موقعیت مکانی X و $X+h$ به عنوان تابعی از فاصله بین آنها (h) است (Yang et al., 2016). در این بررسی با استفاده از نرم افزار $GS+$ مدلی که دارای کمترین مجموع مربعات باقیمانده (RSS) و بیشترین ضریب تبیین R^2 بود، از میان مدل های کروی، نمایی، گوسی و خطی و غیره بر واریوگرام تجربی برازش داده شد. پارامترهای تغییرنا شامل اثر قطعه ای، دامنه تأثیر و آستانه می باشند. مقدار نیم تغییرنا به ازای $h=0$ اثر قطعه ای نامیده می شود. اثر قطعه ای معمولاً ناشی از خطاهای نمونه برداری، اندازه گیری و آنالیز داده ها و یا تغییرات کوچک مقیاس (تغییراتی در فواصلی کمتر از کوچک ترین فاصله نمونه برداری) است. با افزایش h مقدار نیم تغییرنا تا فاصله معینی (دامنه یا شعاع تأثیر) افزایش یافته و پس از آن به حد ثابتی (آستانه) می رسد. برای تعیین وابستگی مکانی ویژگی های خاک از طریق نسبت اثر قطعه ای به حد آستانه بعلاوه اثر قطعه ای استفاده شد (Sani et al., 2023)؛ چنانچه این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد نشان دهنده وابستگی

تجزیه و تحلیل های آماری و زمین آماری

در این پژوهش برای بررسی و تشریح ارتباط و ساختار فضایی از تجزیه و تحلیل تغییرنا یا واریوگرام از نرم افزار $GS+$ نسخه ۹ استفاده شد. از آنجایی که برای محاسبه نیم تغییرنا، لازم است متغیرها از توزیع فراوانی نرمال برخوردار باشند، به دلیل این که تعداد نمونه ها از ۲۰۰۰ عدد کمتر بود از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف برای تعیین نرمال بودن توزیع متغیرها استفاده شد (Bogunovic et al., 2017). تغییرناها تغییرات فاصله ای یا تغییرپذیری ساختاری متغیرها را نشان می دهند. معادله نیم تغییرنا به صورت رابطه ۱ است:

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

در رابطه ۱، $\gamma(h)$ نیم تغییر نمای تجربی، $N(h)$ تعداد کل جفت نقاطی که به فاصله h از یکدیگر قرار گرفته اند و $Z(xi)$ و $Z(xi+h)$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده متغیر Z در نقاط xi و $xi+h$ است.

متغیر کمکی (که دارای همبستگی خوبی با متغیر اصلی است) موجود باشد. تخمین گر کوکریجینگ با فرض وجود یک متغیر کمکی به صورت زیر تعریف می شود (Xu et al., 2020):

$$Z_v(X0) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot Z_v(Xi) \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot Z_w(Xj) \quad (3)$$

که در آن $Z_v(X0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر اصلی Z_v در نقطه α_i و β_j به ترتیب وزن نسبت داده شده به مقادیر مشاهده شده متغیر اصلی Z_v در نقطه x_i و متغیر کمکی Z_w در نقطه x_j و n و m به ترتیب تعداد مشاهدات متغیر اصلی و کمکی می باشند.

ارزیابی روش ها

در این تحقیق از معیارهای آماری ریشه مربعات خطا ($RMSE$) میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین انحراف خطا MBE برای ارزیابی دقت روش ها استفاده گردید که در آن $Z^*(xi)$ و $Z(xi)$ به ترتیب مقادیر تخمین زده شده و واقعی متغیر Z در نقطه x_i و n تعداد کل مشاهدات است. معمولاً هر چه مقدار MAE و $RMSE$ کمتر و مقدار MBE به صفر نزدیک تر باشد، دقت روش بیشتر است (Nourzadeh et al., 2010). علاوه بر معیارهای ذکر شده، ضریب همبستگی (R) بین مقادیر برآورد شده و واقعی نیز محاسبه گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(Xi) - Z(Xi))^2} \quad (4)$$

$$R2 = \frac{\sum_{i=1}^N ((Z(Xi)) - (Z^*(\hat{X}_i)))^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(Xi) - Z(Xi)) \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |Z^*(Xi) - Z(Xi)| \quad (7)$$

نتایج و بحث

خلاصه آماری ویژگی های اندازه گیری شده در خاک های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمون کولموگراف-اسمیرنوف، داده های اندازه گیری شده در مورد تمامی ویژگی های مورد مطالعه از توزیع نرمال برخوردار بودند. ویژگی های آماری این داده ها در جدول ۱ ارائه شده است.

مکانی قوی است و اگر این نسبت بین ۲۵ و ۷۵ درصد قرار گیرد بیانگر وابستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگ تر از ۷۵ درصد گردد نشان دهنده وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود (Bogunovic et al., 2017). همچنین در صورتی که نسبت همبستگی در مورد ویژگی ها برابر ۱۰۰٪ 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 (Tagor et al., 2022). تغییرپذیری ویژگی های خاک ممکن است تحت تأثیر فاکتورهای داخلی مانند فاکتورهای تشکیل خاک و فاکتورهای خارجی مانند کوددهی باشد. غالباً وابستگی مکانی قوی در اثر فرایندهای داخلی (ذاتی) و وابستگی های مکانی ضعیف در اثر فرایندهای خارجی (مدیریتی) حاصل می شود (Ribeiro et al., 2024). لذا فرایندهای داخلی مانند مواد مادری تأثیر بیشتری روی تغییرپذیری این متغیرها در منطقه داشته است. قابل ذکر است که در اراضی کشاورزی تحت کشت، تأثیر فرایندهای مدیریتی مانند کوددهی باید مدنظر قرار گیرد، چرا که این فرایندها به مرور می توانند همبستگی مکانی متغیرهای خاک را تحت تأثیر قرار دهند (Jalili et al., 2016). پس از محاسبه نیم تغییر نما لازم است که بهترین مدل تئوری برای کاربرد در سیستم کریجینگ، بر آن برازش شود. مدل های تئوری مختلفی در این زمینه وجود دارد که از جمله آنها می توان به مدل های خطی، کروی، نمایی و گوسی و ... اشاره کرد.

روش کریجینگ معمولی

در روش کریجینگ معمولی (OK)، مقدار متغیر در هر نقطه نمونه برداری نشده با استفاده از یک متوسط گیری متحرک وزنی خطی مقادیر اندازه گیری شده در همسایگی نقطه مورد نظر تخمین زده می شود (Xu et al., 2020).

$$Z(X0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(Xi) \quad (2)$$

در این رابطه $Z(X0)$ مقدار تخمینی Z در نقطه $X0$ و λ_i وزن نسبت داده شده به متغیر Z در نقطه Xi و n تعداد نقاط همسایگی است.

روش کوکریجینگ

کوکریجینگ (COK) یک حالت چند متغیره از کریجینگ برای موقعیتی است که علاوه بر متغیر اصلی، یک یا چند

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

Table 1. Descriptive statistics of the soil properties examined in the study area

Properties	Unit	Mean	Median	Min	Max	SD	Variance	CV	skewness	kurtosis
PWP	cm ³ cm ⁻³	11.65	11.65	2.6	19.32	4.57	20.83	39.22	-0.05	-1.1
FC	cm ³ cm ⁻³	18.88	20.15	3.57	30.07	6.39	40.88	33.84	-0.32	-0.98
Clay	%	24.79	25	2	45	11.7	136.4	47.19	-0.09	-1.12
Silt	%	28.3	29	4	52	11.64	135.5	41.13	-0.22	-0.69
Sand	%	46.92	46	14	94	21.48	461.7	45.78	-0.55	-0.34
OC	%	0.49	0.47	0.23	0.89	0.16	0.02	32.65	0.52	-0.51
BD	grcm ⁻³	1.42	1.41	1.03	1.67	0.12	0.015	8.45	-0.32	-0.65
TNV	%	31.37	31.45	12.5	52.5	8.87	78.7	28.27	0.008	-0.49

در بین ویژگی‌های مورد مطالعه درصد رس بالاترین ضریب تغییرات (۴۷/۱۹) و وزن مخصوص ظاهری کمترین ضریب تغییرات (۸/۴۵) را داشت. ضریب تغییرات معیاری از تغییرپذیری نسبی است. ضریب تغییرات زیاد 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. در حالی که پایین بودن ضریب تغییرات ناشی از اثر عوامل ذاتی مانند مواد مادری در رفتار این متغیر است (Ribeiro et al., 2024).

ضریب همبستگی بین ویژگی‌های خاک

به منظور بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی بین

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، میزان ضریب همبستگی پیرسون بین زوج پارامترها محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب همبستگی ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی، یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است. به غیر از درصد کربنات کلسیم معادل خاک (آهک)، سایر ویژگی‌های خاک دارای همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد بوده‌اند. متغیرهایی که دارای سطوح همبستگی معنی‌داری هستند، بهترین انتخاب برای کمک به تخمین بهتر خصوصیات مورد مطالعه توسط روش کوکریجینگ به نظر می‌رسند (Seyed Jalili et al., 2019).

جدول ۲ - ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 2. Pearson correlation coefficient between soil characteristics in the studied area

Properties	Sand	Silt	clay	BD	FC	PWP	OC	TNV
sand	1	-0.86**	-0.92**	0.60**	-0.92**	-0.90**	-0.55**	0.21
silt	-0.86**	1	0.62**	-0.53**	0.81**	0.78**	0.37**	0.06
clay	-0.92**	0.62**	1	-0.53**	0.84**	0.83**	0.55**	0.14
BD	0.60**	-0.53**	-0.53**	1	-0.60**	-0.54**	0.26*	-0.17
FC	-0.92**	0.81**	0.84**	-0.60**	1	0.93**	0.55**	0.19
PWP	-0.90**	0.78**	0.83**	-0.54**	0.93**	1	0.54**	0.14
OC	-0.55**	0.37**	0.552**	-0.26*	0.55**	0.54**	1	0.13
TNV	0.17	0.06	0.14	-0.17	0.19	0.14	0.21	1

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

**and * indicate significance at the 1 and 5 percent levels, respectively.

بافت خاک را می‌توان مهم‌ترین ویژگی فیزیکی پایدار خاک دانست که در اغلب پژوهش‌ها و طرح‌های اجرایی به ویژه در تهیه منحنی مشخصه رطوبتی کاربرد دارد (Rasheed

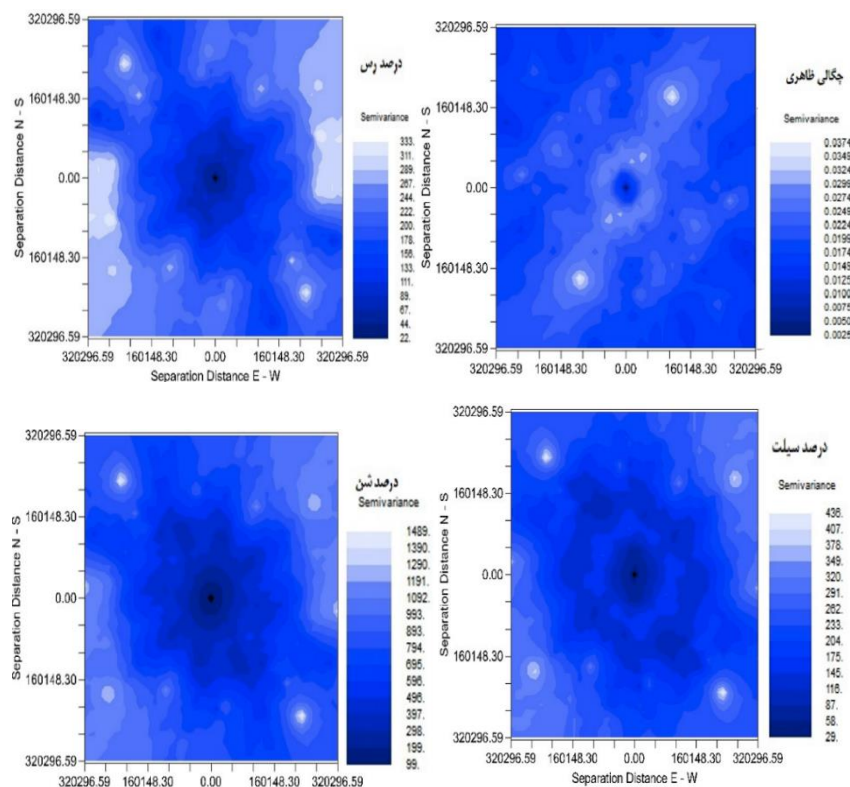
et al., 2020)؛ دلیل این امر تأثیرگذاری بافت خاک بر روی سایر ویژگی‌های خاک مانند جرم مخصوص ظاهری، ذخیره رطوبتی، ساختمان، نفوذپذیری، ظرفیت تبادل کاتیونی و

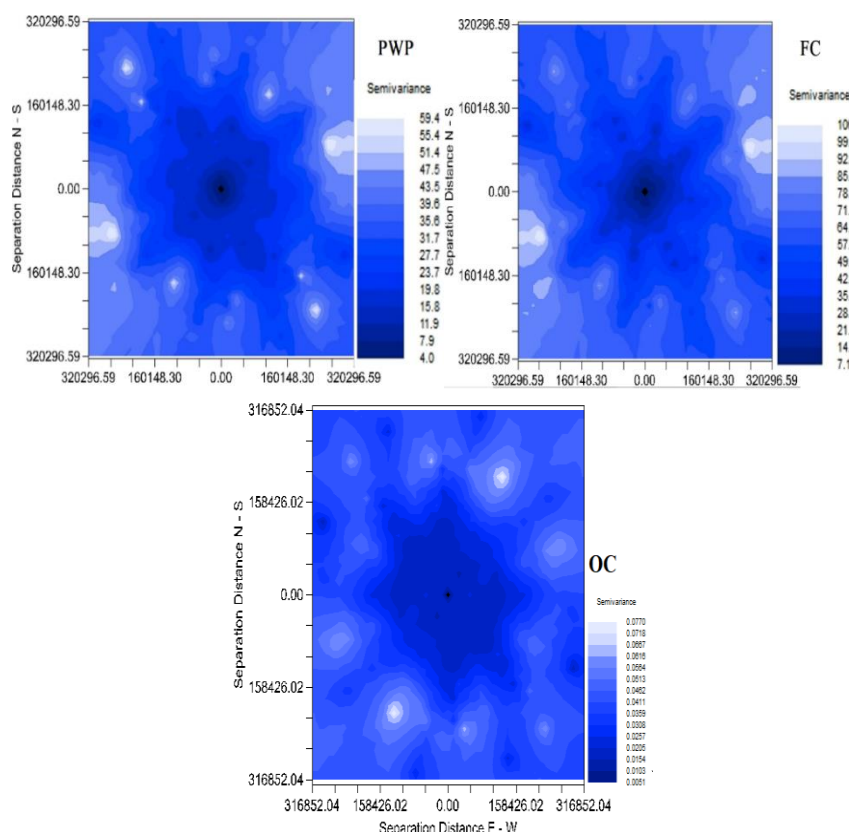
نگهداشت آب تأثیرگذار باشد، اما تأثیر آن نیز به طور مستقیم و مستقل از بافت خاک به اثبات نرسیده است (Zhang *et al.*, 2017)؛ از سوی دیگر، پارامترهای فیزیکی نظیر بافت خاک، چگالی ظاهری و تخلخل کل، همچنان از مهم‌ترین فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده رطوبت خاک به شمار می‌روند. (Wan *et al.*, 2024)

تحلیل همبستگی مکانی

برای تشخیص پدیده همسانگردی (Isotropic) یا ناهمسانگردی (An isotropic) در تحقیق حاضر از تغییرنمای سطحی در محیط GS^+ استفاده شد. با توجه به وجود تقارن مشاهده‌شده در تغییرنمای سطحی، تمامی متغیرها همسانگرد تشخیص داده شدند (Ribeiro *et al.*, 2024). این بدان معناست که تغییرپذیری این متغیرها در جهات مختلف یکسان بوده است و تغییرات عمدتاً تابع فاصله بین جفت نقاط است، بنابراین از نیم‌تغییرنمای همسانگرد برای مراحل بعدی تحقیق استفاده گردید (شکل ۲).

مقدار ماده آلی است. این پژوهشگران طی تحقیقات خود اعلام نمودند که بافت خاک می‌تواند بهترین ابزار برای برآورد رطوبت قابل‌دسترس خاک در نظر گرفته شود. همچنین مقدار رس به علت افزایش خلل و فرج ریز در خاک موجب افزایش نگهداشت آب در خاک شده و میزان رطوبت قابل استفاده در خاک را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. این ضرایب همبستگی بالا بیانگر روند تغییرات مشابه بین خصوصیات مذکور است به طوری که نتایج اجرای راهکارهای مدیریتی می‌تواند بر وضعیت هر یک از این خصوصیات تأثیر مشابهی داشته باشد. از این رو با تعیین خصوصیات مؤثر بر رطوبت خاک می‌توان الگوی تغییرات مکانی آن را جهت توسعه استراتژی‌های مدیریتی برای پایداری سامانه‌های کشاورزی بهتر شناسایی نمود (Yu *et al.*, 2014). بر اساس پژوهش‌های انجام‌گرفته، هرچند کربنات کلسیم معادل می‌تواند از طریق تأثیر بر ساختار خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها به‌صورت غیر مستقیم بر





شکل ۲- بررسی همسانگردی ویژگی‌های خاک شامل چگالی ظاهری، درصد رس و سیلت و شن، FC، PWP و OC

Figure 2. Isotropic investigation of soil properties, including bulk density, clay, silt, and sand percentages, field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), and organic carbon (OC)

پیری صحراگرد و زارع چاهوکی (Piri sahragard & Zare Chahouki, 2015) با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک در شهرستان خاش به این نتیجه رسیدند که خصوصیات مرتبط با خاک (درصد شن، رس و سیلت) دارای ساختار مکانی قوی هستند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارند.

نتایج مربوط به انتخاب بهترین تابع نیم‌تغییرنما برای برازش بر روی داده‌ها، در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشخص است در تمام موارد مدل کروی بیشترین انطباق را با نیم‌تغییرنماهای تجربی محاسبه شده داشته است (جدول ۳). همچنین تمامی متغیرها از ساختار مکانی قوی برخوردار بودند.

جدول ۳- پارامترهای تغییرنما برای متغیرهای خاک

Table 3. Semivariance parameters for soil properties

Soil Property	Variogram model	Nugget	Sill	Range (m)	Spatial dependence percentage	Spatial dependence	R ²	RSS
PWP	Spherical	6.9	54.8	35300	12.59	Strong	0.94	67.2
FC	Spherical	12	94.93	40400	12.64	Strong	0.92	316
BD	Spherical	0.008	0.28	33700	3.8	Strong	0.83	0.003
Clay	Spherical	42.3	277	64700	15.27	Strong	0.95	1775
Silt	Spherical	37	430	60000	8.6	Strong	0.74	1993
Sand	Spherical	67	1570	71100	4.26	Strong	0.92	6551
OC	Spherical	0.02	0.03	58100	68.3	Moderate	0.66	0.0003

کودهای آلی، شخم و روش‌های کشت و کار با تأثیر بر روی میزان و ساختار خلل و فرج خاک، بر روی پارامترهای نگهداشت آب در خاک و نیز وزن مخصوص ظاهری آن تأثیرگذار بوده است؛ درحالی‌که بافت خاک جزو ویژگی‌های ذاتی خاک بوده و کمتر دستخوش تغییرات ناشی از مدیریت قرار می‌گیرد.

مقایسه روش‌های مورد استفاده در درون‌یابی ویژگی‌های مورد مطالعه

در جدول ۴ نتایج مربوط به درون‌یابی نقاط FC و PWP با استفاده از دو روش کریجینگ و کوکریجینگ ارائه شده است. در این درون‌یابی از ۱۶ نقطه در شعاع همسایگی هر داده، برای برآورد هر متغیر آورده شده است. همانطور که مشخص است روش کریجینگ از دقت بالاتری در برآورد نقاط FC و PWP نسبت به روش کوکریجینگ برخوردار بوده است. از آنجا که نتایج درون‌یابی در روش کوکریجینگ با استفاده از داده‌های کمکی درصد رس، وزن مخصوص ظاهری و درصد شن کاملاً مثل هم بود. به همین دلیل در جدول ۴ نتایج مربوط به کوکریجینگ با استفاده از درصد شن و وزن مخصوص ظاهری ارائه نشد. به احتمال زیاد این امر به دلیل همبستگی بسیار بالا بین این ویژگی‌ها است که در جدول ۲ ارائه شد.

افضلی و همکاران (Afzali et al., 2018) نیز نتیجه مشابهی را در رابطه با بافت خاک گزارش نمودند. دارت و همکاران (Duarte et al., 2021) برای ذرات رس همبستگی مکانی قوی و برای وزن مخصوص ظاهری همبستگی مکانی متوسط گزارش نمودند. ریبرو و همکاران (Ribeiro et al., 2024) نیز گزارش کردند که وابستگی مکانی قوی ممکن است به‌وسیله تغییرات ذاتی خاک و وابستگی مکانی ضعیف‌تر به‌وسیله تغییرات غیر ذاتی خاک (مدیریتی) کنترل شود. از آنجا که بافت خاک جزو ویژگی‌های ذاتی خاک به شمار می‌رود، کمتر تحت تأثیر نوع مدیریت زراعی قرار می‌گیرد. وابستگی مکانی درصد کربن آلی خاک متوسط بود که نشان می‌دهد عوامل مدیریتی مانند مصرف کودهای آلی در خاک بر روی این ویژگی تأثیر زیادی داشته است.

کمتر بودن دامنه تأثیر نشان‌دهنده تغییر و ناهمگونی بیشتر آن در منطقه مورد مطالعه است (Foroughifar et al., 2011). از بین ویژگی‌های مورد مطالعه در این تحقیق، وزن مخصوص ظاهری، کربن آلی، PWP و FC دامنه تأثیر کمتری نسبت به بافت خاک داشتند. بر اساس منابع کم بودن دامنه تأثیر را می‌توان به عوامل مدیریتی (تغییر کاربری، مدیریت آبیاری، شخم، کود دهی و ...) ارتباط داد؛ بنابراین به نظر می‌رسد مدیریت زراعی مانند مصرف

جدول ۴- ارزیابی آماری دقت روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد FC و PWP

Table 4. Statistical evaluation of the accuracy of kriging and cokriging methods in estimating FC and PWP

Final Rank	Total Ranks	FC			Final Rank	Total Rank	PWP			Methods
		R2	RMSE	MBE			R2	RMSE	MBE	
1	5	0.68(1)	3.06(1)	0.192(3)	1	5	0.66(1)	2.65(1)	0.138(3)*	Krijing
2	6	0.66(3)	3.72(2)	-0.009(1)	2	6	0.62(2)	2.96(3)	0.029(1)	Cokrijing (clay)**
2	6	0.67(2)	3.72(2)	0.025(2)	3	8	0.60 (4)	2.90(2)	0.068(2)	Cokrijing (silt)**
2	6	0.66(3)	3.72(2)	-0.009(1)		6	0.61(3)	2.90(2)	0.029(1)	Cokrijing (OC)**

*: رتبه روش زمین‌آماري مورد استفاده از نظر دقت برآورد ویژگی،

*: Ranking of the geostatistical method used in terms of accuracy of feature estimation

** داده کمکی

**: Auxiliary variable

ویژگی‌های مختلف اشاره شده است. پژوهشگران دلیل این برتری را در این امر می‌دانند که استفاده از اطلاعات تکمیلی

در پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً به برتری روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ معمولی در برآورد

و داده‌های کمکی در فرآیند درونیابی منجر به بهبود نتایج خواهد شد (Young Lim & Wu, 2022). در پژوهش انجام‌گرفته توسط دارت و همکاران (Duarte et al., 2021) نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه‌شده به روش کوکریجینگ جزئیات بیشتری را نسبت به روش کریجینگ نشان داد اما میزان خطای برآورد پارامترها در هر دو روش یکسان بود. در پژوهش‌های مختلفی ذکرشده است که در صورت استفاده از روش نمونه‌برداری مناسب و پراکنش یکنواخت نمونه‌ها در کل منطقه مورد مطالعه، روش کریجینگ می‌تواند اکثر ویژگی‌های موردبررسی را با دقت قابل قبولی برآورد کند (Piri sahragard & Chahouki, 2015؛ Fuhg et al., 2020).

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که هرچند روش کوکریجینگ، با بهره‌گیری از داده‌های کمکی مانند درصد رس یا سیلت، می‌تواند دقت پیش‌بینی را در برخی شرایط بهبود بخشد، اما در مطالعه حاضر روش کریجینگ به تنهایی و بدون نیاز به داده‌های کمکی، عملکردی قابل قبول و حتی برتر را در تخمین پارامترهای رطوبتی خاک (FC و PWP) نشان داد. این امر به ویژه زمانی اهمیت می‌یابد که ساختار مکانی ویژگی‌ها به قدر کافی قوی باشد، همانطور که در این پژوهش نسبت اثر قطعه‌ای به کل واریانس برای اکثر پارامترها کمتر از ۲۵ درصد بود که حاکی از وجود همبستگی مکانی بالا است. ژینگ-وای و همکاران (Xing-Yi et al., 2007) در شمال چین به بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک با استفاده از زمین‌آمار پرداختند. نتایج نشان داد روش کریجینگ به‌طور موفقیت‌آمیزی توانسته متغیرها را با دقت بالا درونیابی کند.

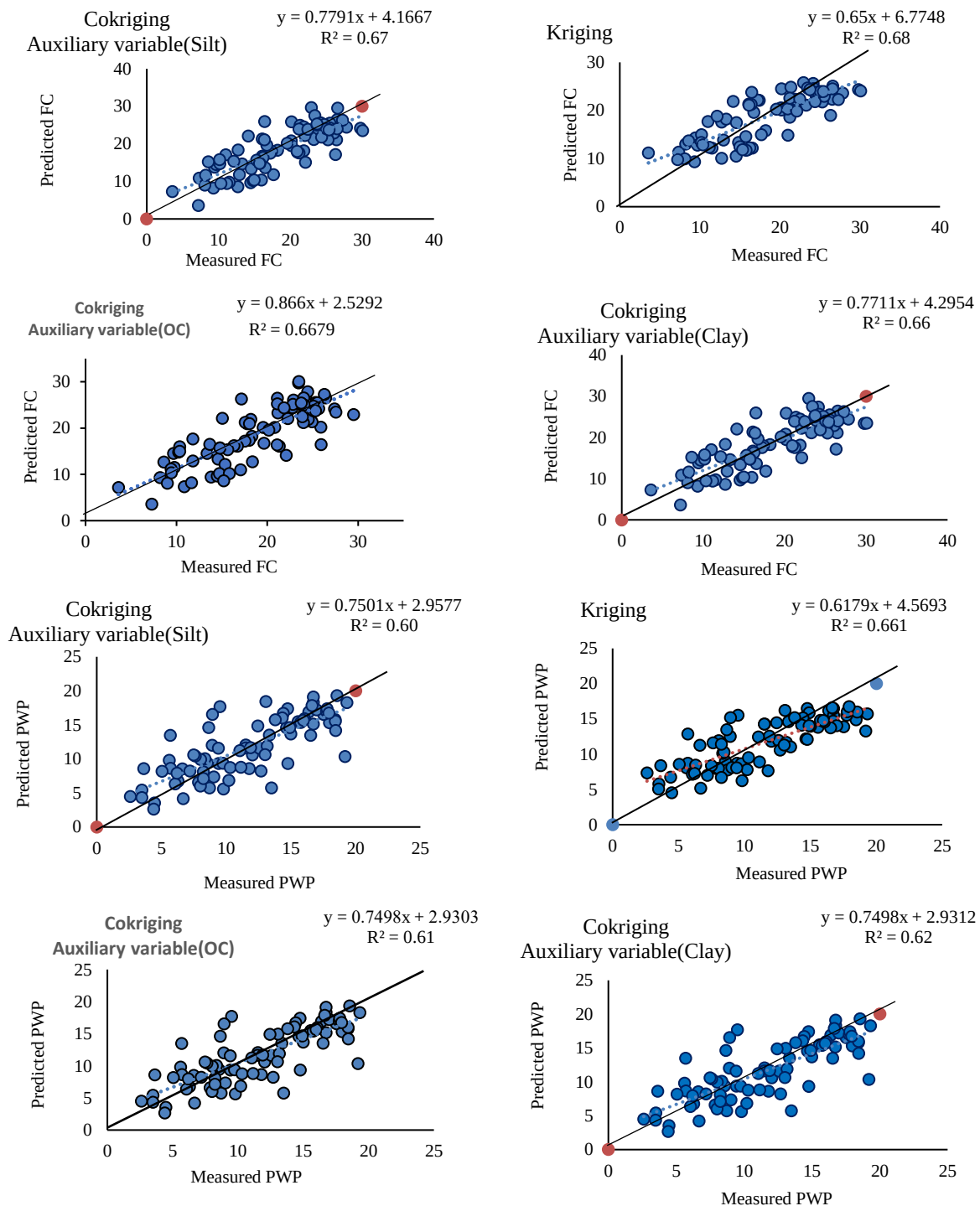
وو و همکاران (Wu et al., 2008) در مطالعه‌ای بر روی پراکنش مقدار ماده آلی در خاک‌های شمال شرق چین ثابت

نمودند که روش کریجینگ معمولی می‌تواند توزیع مکانی ماده آلی خاک را به دقت برآورد کند. همچنین در بررسی انجام‌گرفته توسط فام و همکاران (Pham et al., 2019) با هدف ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد برخی ویژگی‌های خاک در یک منطقه در ویتنام، روش کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی ماده آلی خاک ۳/۳٪ و برای پهنه‌بندی نیتروژن کل موجود در خاک ۱۰٪ دقیق‌تر از روش کوکریجینگ بود؛ اما برای پهنه‌بندی pH خاک روش کوکریجینگ دقیق‌تر از روش کریجینگ معمولی (۸۱/۱٪) بود. از نظر این پژوهشگران، انتخاب متغیرهای کمکی بیشتر و تراکم نمونه‌برداری بالاتر باعث بهبود کارایی روش کوکریجینگ می‌شود. باسکان و همکاران (Baskan et al., 2018) در بررسی کارایی روش‌های درونیابی کریجینگ معمولی و کوکریجینگ برای تخمین توزیع مکانی حدود آتربرگ^۱ در خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک به عنوان متغیرهای کمکی، به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ از خطای کمتری در برآورد حدود آتربرگ و ویژگی الاستیسیته خاک برخوردار بود.

شکل ۳ پراکندگی مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده به کمک روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ را حول محور یک به یک نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است پراکندگی نقاط اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده در مورد هر دو پارامتر FC و PWP در دو روش درونیابی کریجینگ و کوکریجینگ از تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار نیست و مقادیر بسیار نزدیک ضرایب تعیین (R^2) نیز این امر را تأیید می‌کند. مقادیر ضرایب تعیین برای مقادیر FC در روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ (داده کمکی رس)، کوکریجینگ (داده کمکی سیلت) و کوکریجینگ (داده کمکی کربن آلی)

۰/۹۲)، می‌توان نتیجه گرفت که ویژگی‌های هدف (FC و PWP) به‌خوبی توسط خود داده‌های اولیه قابل پیش‌بینی بودند، بدون آن که نیازی به افزودن داده‌های کمکی باشد. در همین راستا شکل ۴ نقشه پراکنش و در اصل پهنه‌بندی ویژگی‌های FC و PWP را بر اساس روش درون‌یابی کریجینگ با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، نشان می‌دهد.

به ترتیب معادل ۰/۶۶، ۰/۶۲ و ۰/۶۰ و برای مقادیر PWP به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۷ و ۰/۶۷ است که در هر دو مورد با اختلاف کمی برای روش کریجینگ بیشتر بوده است. همچنین، از آنجا که ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن) و چگالی ظاهری و همچنین درصد کربن آلی موجود در خاک، همبستگی بالایی با پارامترهای رطوبتی نشان دادند (با ضرایب بین ۰/۵۴ تا

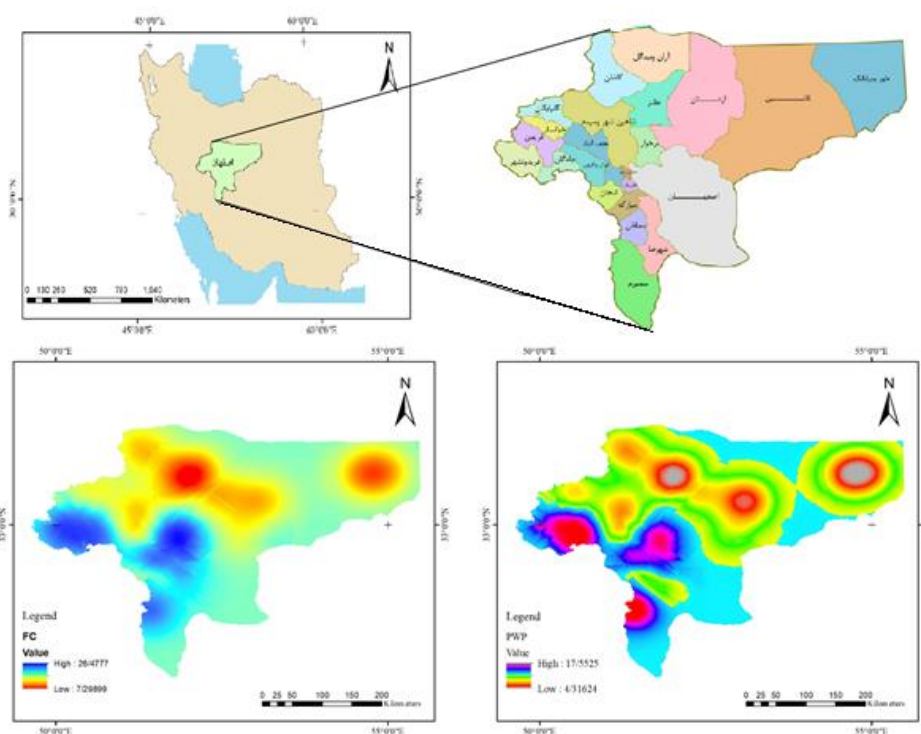


شکل ۳ - مقادیر FC و PWP اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر برآورد شده آنها با روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ
Figure 3. Measured FC and PWP values versus their estimated values using kriging and cokriging methods

شود، نه صرفاً بر اساس فرض برتری ذاتی یک روش بر دیگری. از سوی دیگر مطابق با مطالعات پیشین در صورتی که داده‌های کمکی فاقد همبستگی مکانی قوی با متغیر هدف باشند، استفاده از روش کوکریجینگ نه تنها سودمند نخواهد بود بلکه ممکن است موجب افزایش پیچیدگی مدل گردد (Li & Heap, 2014; Hengl et al., 2018).

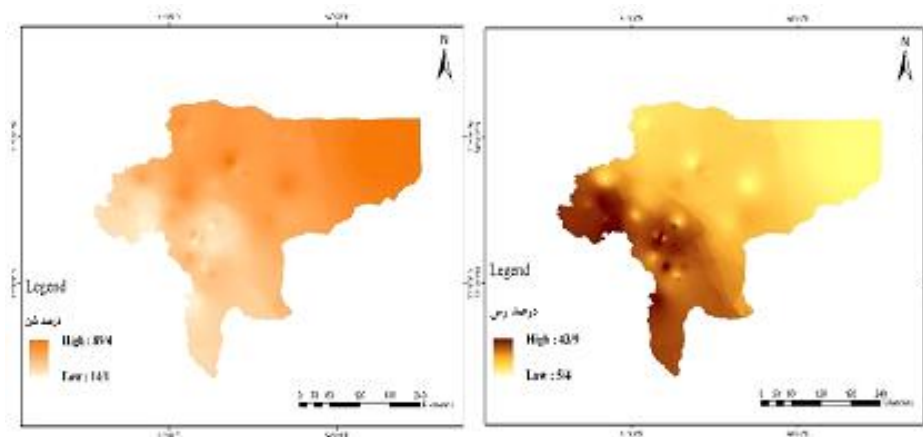
با توجه به شکل ۴ بالاترین مقادیر FC و PWP در قسمت غرب و جنوب غرب استان و کمترین مقادیر این پارامترها در قسمت شمال و به ویژه شمال شرق استان مشاهده می‌شود (شکل ۴). دلیل این امر بالاتر بودن درصد رس در خاک در قسمت‌های غرب و جنوب استان است (شکل ۵). همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود درصد ذرات شن موجود در خاک به سمت شمال و به ویژه شرق استان افزایش و میزان رس به صورت محسوسی کاهش پیدا می‌کند. وجود مقادیر بالای رس در خاک میزان نگهداشت آب در خاک را افزایش می‌دهد.

این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های اخیر همخوانی دارد؛ به‌طور مثال، ون و همکاران (Wan et al., 2024) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) نیز گزارش کردند که در برخی موارد، کوکریجینگ مزیتی نسبت به کریجینگ ارائه نمی‌دهد و روش کریجینگ به دلیل سرعت بالاتر، نیاز کمتر به داده‌های مکمل و سهولت اجرا، انتخابی منطقی‌تر در شرایط خاص تلقی می‌شود. در شرایطی که هدف، ترسیم یک تصویر کلی از توزیع مکانی ویژگی‌های خاک با دقت قابل قبول و در زمان محدود است، روش کریجینگ می‌تواند گزینه‌ای مؤثر و اقتصادی باشد. در نتیجه، می‌توان گفت در این مطالعه، با توجه به ساختار مکانی قوی، ویژگی‌های فیزیکی خاک و همبستگی‌های بالا میان متغیرها، استفاده از روش کریجینگ به تنهایی کافی و کارآمد بوده است و نیاز به استفاده از روش‌های پیچیده‌تر مانند کوکریجینگ احساس نشد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که انتخاب روش مناسب در تحلیل مکانی باید بر مبنای هدف مطالعه، ویژگی‌های آماری داده‌ها و منابع اطلاعاتی موجود انجام



شکل ۴- نقشه‌های پراکنش مکانی FC و PWP بر اساس روش کریجینگ در منطقه مورد مطالعه

Figure 4. FC and PWP spatial distribution maps in the study area based on the Kriging method



شکل ۵- نقشه‌های پراکنش مکانی درصد ذرات رس و شن در منطقه مورد مطالعه

Figure 5. Spatial distribution maps showing the percentage of clay and sand particles in the study area

نتیجه‌گیری کلی

بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که روش کریجینگ، با وجود استفاده صرف از متغیر اصلی و عدم بهره‌گیری از متغیر کمکی، قادر بوده است تخمین‌هایی با دقت قابل قبول و ساختار فضایی منسجم ارائه دهد. این یافته در تضاد با فرض غالب در ادبیات موضوع است که کوکریجینگ را به دلیل ادغام داده‌های کمکی، همواره برتر از کریجینگ قلمداد می‌کند. در شرایطی که داده‌های اصلی از چگالی و کیفیت مناسبی برخوردار باشند و همبستگی فضایی مشخصی میان مشاهدات وجود داشته باشد، به‌کارگیری کریجینگ می‌تواند راهکاری کارآمدتر و بهینه‌تر از کوکریجینگ تلقی گردد. این مزیت به ویژه در مواردی که دسترسی به متغیر کمکی با دشواری، هزینه یا عدم قطعیت همراه است، بیشتر نمود می‌یابد. همچنین، کاهش پیچیدگی محاسباتی، سرعت بالاتر در اجرای مدل و عدم نیاز به تعیین ساختار کوواریوگرام متقاطع، از دیگر نقاط قوت این روش محسوب می‌شود. بر این اساس، نتایج این مطالعه نشان داد که انتخاب روش میان کریجینگ و کوکریجینگ نباید صرفاً بر پایه پیش فرض‌های نظری صورت گیرد، بلکه باید با توجه به ویژگی‌های آماری داده‌ها، ماهیت متغیرها و محدودیت‌های عملیاتی پروژه تصمیم‌گیری شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، مطالعات مقایسه‌ای بیشتری با تمرکز بر سناریوهای مختلف تراکم داده، سطح ناهمگنی مکانی و میزان همبستگی میان متغیرها صورت گیرد تا دستورالعمل‌های روشن‌تری برای انتخاب بهینه روش‌های درون‌یابی توسعه یابد.

ذرات رس به دلیل داشتن سطح ویژه بالا و بار الکتریکی منفی، قادر به جذب و نگهداری مقادیر زیادی آب هستند. همچنین بسته به نوع رس موجود در خاک، ساختار لایه‌ای و وجود منافذ ریز بسیار زیاد باعث می‌شود ذرات آب با نیروی کشش سطحی قوی در این منافذ تا مدت طولانی‌تری باقی‌مانده و در نتیجه میزان آب موجود در این ذرات در فشارهای مختلف بسیار بالاتر از خاک‌های شنی است (Romero *et al.*, 2011). ضمن این که وجود شرایط اقلیمی مناسب‌تر و بارش بیشتر در جنوب و به ویژه جنوب غرب استان شرایط مساعدتری را برای کشت و زرع فراهم آورده و وسعت بسیار بیشتری از زمین‌ها در مقایسه با شمال و به‌خصوص شمال شرق استان تحت کشت هستند که باعث بالاتر بودن مقادیر مواد آلی در خاک شده است.

مطالعه انجام‌گرفته توسط مشایخی و مرجوی (Mashayekhi & Marjovvi, 2022) بر روی توزیع مکانی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اراضی استان اصفهان نیز نشان داد که میزان مواد آلی و نیز درصد رس در جنوب استان بالا بوده و با حرکت به سمت شرق و به ویژه شمال شرق درصد شن در خاک بیشتر و میزان ماده آلی کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس همین پژوهش میزان حاصلخیزی خاک و درصد عناصر غذایی موجود در خاک در قسمت‌های جنوبی بیشتر بوده که شرایط مساعدتری برای کشت و کار به همراه داشته است. مجموع این عوامل باعث افزایش نگهداشت آب در خاک شده و مقدار رطوبت در نقاط FC و PWP بالاتر است؛ اما با رفتن به سمت شمال با شنی‌تر شدن بافت خاک و کاهش مواد آلی خاک میزان نگهداشت آب در خاک به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

Reference

- Afzali A., Varwani V., Jafarinia R. 2018. Application of geostatistics technique in predicting spatial changes of soil texture (Case study: Farahan Plain, Central Province). *Geographical Quarterly*, 15(58): 1-16. (In Persian)
- Amsili J.P., van Es H.M., Schindelbeck R.R. 2024. Pedotransfer Functions for Field Capacity, Permanent Wilting Point, and Available Water Capacity Based on Random Forest Models for Routine Soil Health Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55: 1967 - 1984.
- Asgarzadeh H., Mosaddeghi M. R., Dexter A. R., Mahboubi A. A., and Neyshabouri M. R. 2014. Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 226–227: 8–20.
- Basaran M., Erpul G., Ozcan A.U., Saigin D.S., Kibar M., Bayramin I., Yilman F.E. 2011. Spatial information of soil hydraulic conductivity and performance of cokriging over kriging in a semi-arid basin scale. *Environmental Earth Science*, 63: 827–838.
- Başkan O., Erpul G., Dengiz O. 2018. Comparing the efficiency of ordinary kriging and cokriging to estimate the Atterberg limits spatially using some soil physical properties. *Clay Minerals*, 44: 181 - 193.
- 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.
- Castellini M., Vonella A.V., Ventrella D., Rinaldi M., and Baiamonte, G. 2020. Determining Soil Hydraulic Properties Using Infiltrometer Techniques: An Assessment of Temporal Variability in a Long-Term Experiment under Minimum- and No-Tillage Soil Management. *Sustainability*.
- Delbari M., Jahani S. 2014. Investigating the spatial changes of salinity and sodium characteristics of the soils of Chat region in Golestan province. *Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 28 (2): 433-446. (In persion)
- Duarte S., Vieira S. R., Giarola N.F.B., and Silva A.P. 2021. Kriging Versus Cokriging and Collocated Cokriging for Soil Physical-Hydraulic Attributes and their Influence on Soybean Growth. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Vol.64.
- Erdogan Erten G., Yavuz M., Deutsch C.V. 2022. Combination of Machine Learning and Kriging for Spatial Estimation of Geological Attributes. *Natural Resources Research*, 1-23.
- 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)
- Fuhg J.N., Fau A., Nackenhorst U. 2020. State-of-the-Art and Comparative Review of Adaptive Sampling Methods for Kriging. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 2689 - 2747.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd American Society of Agronomy, Agronomy Monographs 9(1), Madison, Wisconsin, 1188 pp
- Hengl T., Heuvelink G. B. M., Stein A. 2018. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120(1-2): 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018>
- Hoseini Y. 2024. Evaluation of geostatistical and response surface methods for estimating soil saturated hydraulic conductivity using soil physical properties. *Applied Soil Research*, 11 (4): 63-76. (In persion)
- Li J., Heap A. D. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53: 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Lim C. Y., Wu W.Y. 2022. Conditions on which cokriging does not do better than kriging. *Journal of Multivariate Analysis*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2022.105084>.
- Mashayekhi, P., Marjovi, A. R. 2023. Spatial distribution of some soil physico-chemical properties in agricultural soils of Isfahan province, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(2), 389-405. (In persion)
- 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.
- Pham T.G., Kappas M., Huynh C.V., Nguyen L.H. 2019. Application of Ordinary Kriging and Regression Kriging Method for Soil Properties Mapping in Hilly Region of Central Vietnam. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 8, 147.

- 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.
- Qiao J., Zhu Y., Jia X. 2019. Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China. *J Soils Sediments* 19, 140–147. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2036-x>
- Rasheed M.W., Tang J., Sarwar A., Shah S., Saddique N., Khan M.U., Imran Khan M., Nawaz S., Shamshiri R.R., Aziz M., and Sultan M. 2022. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*.
- Rezaei H., Moshiri F., Balali M.R. Bazargan K., Esmaeelnejad L., Mallah S. 2024. Determination of Soil Fertility Management Zones in Honam Sub-Basin for Wheat Production Using Geostatistical Methods, Principal Component Analysis & Fuzzy Clustering (Lorestan Province). *Applied Soil Research*, 12(3): 16-32.
- Romero E., Vecchia G.D., and Jommi C. 2011. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Geotechnique*, 61: 313-328.
- Ribeiro D.L., Maltauro T.C., Guedes L.P., Uribe-Opazo M.A., Dalposso G.H. 2024. Directional Differences in Thematic Maps of Soil Chemical Attributes with Geometric Anisotropy. *Stats*.
- Sani S., Abdulkadir A.N., Hmad Pantami S.A., Sani M., Amin A.M., Abdullahi M.Y. 2023. Spatial Variability and Mapping of Selected Soil Physical Properties under Continuous Cultivation. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*.
- Seyed Jalali S.A.R., Sarmadian F., MohammadEsmailc Z., Navidia V. 2019. Assessment of spatial variability of cation exchange capacity with kriging and cokriging. *Desert*, 24(1): 99-108.
- Tagore G.S., Sethy S., Kulhare P.S., Sharma G.D. 2022. Characterization of Spatial Variability of Micro Nutrients in Soils: Classical Vs. Geo-Statistical Approach. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54: 472 - 487.
- Walkley A.J., Black, I.A. 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wan Y., Liu X., Chen H., Wang Y. 2024. Comparative evaluation of kriging and cokriging methods for spatial prediction of soil properties under limited sampling. *Catena*, 232, 107426. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107426>
- Wan H., Li J., Shang S., Rahman K.U. 2021. Exploratory factor analysis-based co-kriging method for spatial interpolation of multi-layered soil particle-size fractions and texture. *Journal of Soils and Sediments*, 21: 3868 - 3887.
- Wang L., Tang L., Wang Z., Liu H., Zhang W. 2020. Probabilistic characterization of the soil-water retention curve and hydraulic conductivity and its application to slope reliability analysis. *Computers and Geotechnics*, 121, 103460.
- 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.
- Xu T., Liu Y., Tang L., Liu C. 2020. Improvement of Kriging interpolation with learning kernel in environmental variables study. *International Journal of Production Research*, 60: 1284 - 1297.
- Yang H., Zhang F., Chen Y., Xu T., Cheng Z., Liang J. 2016. Assessment of reclamation treatments of abandoned farmland in an arid region of China. *Sustainability*, 8, 1183.
- Yu J., Li Y., Guangxuan H., Di Z., Yuqin F., Bo G., Guangmei W., Kai Ning., Wang J. 2014. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta. *Environmental Earth Science*, 72: 589-599. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2980-0>.
- Zhang J., Li X., Yang R., Liu Q., Zhao L., Dou B. 2017. An Extended Kriging Method to Interpolate Near-Surface Soil Moisture Data Measured by Wireless Sensor Networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17.