

Assessing the Importance of Sampling Distance on the Spatial Structure of Available Potassium in the Agricultural Soils of Shahrekord Plain

M. Barati Zanyani^{1*}, M.H. Salehi¹, A. Hossienpur¹, A. Jafari²

1- Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
(*- Corresponding Author Email: marziehbarati99@yahoo.com)

2- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 07 October 2025
Revised: 15 December 2025
Accepted: 10 January 2026
Available Online: 10 January 2026

How to cite this article:

Barati Zanyani, M., Salehi, M.H., Hossienpur, A., & Jafari, A. (2026). Assessing the effect of sampling distance on the spatial structure of available potassium in the agricultural soils of Shahrekord Plain. *Journal of Water and Soil*, 39(6), 529-538. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95838.1504>

Introduction

Nowadays, the application of variable-rate fertilization is primarily based on soil analysis maps. These maps play a crucial role in decision-making for fertilizer management and the optimization of plant nutrient use. However, the sampling distance is often determined without considering the spatial variability of soil properties, which can lead to reduced map accuracy and inappropriate fertilization recommendations. Previous studies have shown that the density and spacing of soil samples have a significant impact on the accuracy of geostatistical models and the quality of maps produced using methods such as kriging. Moreover, soil management practices, including varying fertilizer application patterns, crop rotation, and historical land use, can strongly influence the spatial patterns of soil nutrients. Therefore, investigating the effect of sampling distance on the spatial distribution of major soil nutrients, particularly available potassium, can help optimize soil sampling and provide more precise recommendations for variable-rate fertilization. The present study aimed to examine the effect of sampling distance on the spatial structure of available potassium in the agricultural soils of the Shahrekord Plain.

Material and Methods

For this purpose, 120 soil samples were collected using a regular grid sampling design with a spacing of 1335 meters from the surface layer of agricultural soils in the Shahrekord plain, covering an area of 21400 ha, and the available potassium content was determined in the laboratory. Descriptive statistics of the data, including the minimum, maximum, mean, median, coefficient of variation, and skewness of the variable, were calculated, and the normality of the data distribution was assessed using histograms and the Kolmogorov–Smirnov test. The experimental variogram of available potassium was constructed, and various theoretical models were fitted to it. Subsequently, the variogram parameters and the spatial dependency class of the variable were determined. Model validation was performed by adjusting the initial parameters so that the final optimized model had a mean error (ME) close to zero and a minimum mean squared error (MSE). Ordinary kriging in ArcGIS 10.3 was then used to produce maps of available potassium.

Results and Discussion

The available potassium in the soils ranged from 120 to 812 mg kg⁻¹, with a coefficient of variation of 38.2%. The data were not normally distributed; however, the log-transformed data followed a normal distribution. Geostatistical analysis indicated that the exponential model best fitted the data. The nugget effect was 0.108, and the range of this variable was estimated at 53300 meters, indicating that the selected sampling distance is much smaller than the spatial variability range; therefore, the sampling distance appears to be sufficient. However, the



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.95838.1504>

exponential variogram is nearly flat at short distances, showing little change in semivariance, which reflects the influence of strong soil management practices, such as varying fertilizer application patterns, crop rotation, and historical land use, on data dispersion. The spatial dependence of the studied variable was 50.2%, which falls into the moderate spatial dependence class. The mean error (ME) of the estimated available potassium was -0.0008 , and the mean squared error (MSE) was 0.011, indicating the unbiasedness and high accuracy of the estimation. The maps produced using the kriging method exhibited acceptable accuracy. This was achieved despite the increased variability at short distances and the disruption of regular spatial patterns caused by intensive soil management practices.

Conclusion

According to the findings, using an appropriate sampling distance is essential to accurately represent the spatial variability of major soil nutrients, particularly potassium. The findings of this study indicated that the current sampling distance is not sufficient to accurately represent the spatial variability of available potassium in the soils under investigation. Therefore, for future studies, it is recommended to investigate the effect of sampling distance at distances shorter than 1,335 meters to evaluate the model sensitivity and the accuracy of kriging maps at larger scales. This can help optimize soil sampling and provide more precise recommendations for variable-rate fertilizer application. Furthermore, it is recommended that future studies also consider the role of soil management practices in the spatial modeling of potassium, as these factors can strongly influence the spatial distribution of soil nutrients.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Soil Science Department of the University of Shahrekord for providing equipment and facilities.

Keywords: Available potassium, Distance, Kriging, Sampling, Variogram

بررسی اهمیت فاصله نمونه برداری بر ساختار مکانی پتاسیم قابل استفاده در خاک‌های زراعی دشت شهرکرد

مرضیه براتی زانیانی^{۱*} - محمدحسن صالحی^۱ - علیرضا حسین پور^۱ - اعظم جعفری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

چکیده

امروزه کاربرد کود با نرخ متغیر عمدتاً بر پایه نقشه‌های آنالیز خاک انجام می‌شود، با این حال، فاصله نمونه برداری اغلب بدون توجه به تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک تعیین می‌گردد. پژوهش حاضر با هدف بررسی اهمیت فاصله نمونه برداری بر توزیع مکانی پتاسیم قابل استفاده در خاک‌های زراعی دشت شهرکرد انجام شد. بدین منظور، ۱۲۰ نمونه خاک به روش نمونه برداری شبکه‌بندی منظم با فواصل ۱۳۳۵ متر از لایه سطحی خاک‌های زراعی دشت شهرکرد با مساحت ۲۱۴۰۰ هکتار جمع‌آوری شد و مقادیر پتاسیم قابل استفاده در آزمایشگاه تعیین گردید. دامنه تغییرات پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها از ۱۲۰ تا ۸۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم بود و ضریب تغییرات آن، ۳۸/۲ درصد بود. تحلیل زمین آماری نشان داد که مدل نمایی بیشترین تناسب را با داده‌ها دارد و همبستگی مکانی پتاسیم قابل استفاده در سطح متوسط است. دامنه تأثیر این متغیر برابر با ۵۳۳۰۰ متر برآورد شد که نشان می‌دهد فاصله نمونه برداری انتخاب شده بسیار کمتر از دامنه تغییرپذیری مکانی است؛ بنابراین فاصله نمونه برداری کافی به نظر می‌رسد. با این حال، واریوگرام نمایی در فواصل کوتاه تقریباً افقی است، به گونه‌ای که نیم‌واریانس تغییر چندانی ندارد و این وضعیت نشان‌دهنده تأثیر تغییرات مدیریتی شدید خاک مانند؛ الگوهای متفاوت مصرف کود، تناوب زراعی و سابقه بهره‌برداری بر پراکندگی داده‌ها است. علی‌رغم افزایش تغییرپذیری در فواصل کوتاه و کاهش الگوی مکانی منظم ناشی از تغییرات مدیریتی شدید خاک، نقشه‌های حاصل از روش کریجینگ دقت قابل قبولی دارند. بنابراین، اگرچه فاصله نمونه برداری از نظر دامنه اثر کافی است، این فاصله نمی‌تواند تمام نوسانات کوچک‌برد ناشی از مدیریت خاک را به‌طور کامل ثبت کند. برای مطالعات آینده توصیه می‌شود که اثر تراکم نمونه برداری در فواصل کمتر از ۱۳۳۵ متر مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان حساسیت مدل و دقت نقشه‌های کریجینگ را در مقیاس‌های بزرگ‌تر ارزیابی کرد. این امر می‌تواند به بهینه‌سازی نمونه برداری از خاک و ارائه توصیه‌های دقیق‌تر برای کاربرد کود با نرخ متغیر کمک کند.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم قابل استفاده، فاصله، کریجینگ، نمونه برداری، واریوگرام

مقدمه

رایج‌ترین ابزار برای تعیین نیاز گیاهان به کودهای شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه سطح اولیه حاصلخیزی خاک و میزان خروج عناصر غذایی در اثر برداشت محصول و کوددهی در سطح مزرعه یکنواخت نیست، شناسایی تغییرپذیری مکانی عناصر غذایی در خاک‌های زراعی برای برنامه‌ریزی بهینه کوددهی و مدیریت موثر تغذیه

فرآیند رشد و برداشت محصولات کشاورزی منجر به خروج عناصر غذایی از خاک می‌شود، از آنجا که تداوم این روند می‌تواند حاصلخیزی خاک را کاهش دهد، برای حفظ حاصلخیزی و پایداری تولید لازم است این عناصر از طریق کوددهی جایگزین شوند. آزمون خاک به‌عنوان

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: marziehbarati99@yahoo.com

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

گیاهان اهمیت ویژه‌ای دارد (Mallarino & Blanchet et al., 2017; Wittry, 2000).

تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک نقش مهمی در مدیریت پایدار کشاورزی، بهینه‌سازی منابع و تصمیم‌گیری علمی در مدیریت خاک دارد (Li & Heap, 2008). عناصر غذایی ضروری خاک ماهیتی پویا داشته و نیازمند مدیریت به‌موقع در مزارع کشاورزی هستند. پیش‌بینی دقیق توزیع مکانی عناصر غذایی خاک با استفاده از تراکم نمونه‌برداری مناسب، پیش‌نیاز بهبود کاربرد عملی نقشه‌های حاصلخیزی خاک مکانی است (Sahrawat et al., 2008). با این حال، ارائه چنین اطلاعاتی معمولاً با چالش‌هایی همراه است، از جمله هزینه بالای نمونه‌برداری، صرف وقت زیاد و ضرورت انتخاب طرح نمونه‌برداری بهینه برای شناسایی ساختار مکانی.

پتاسیم یکی از عناصر ضروری برای رشد و عملکرد گیاهان در خاک‌های زراعی محسوب می‌شود و نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند سنتز پروتئین، فتوسنتز، انتقال قندها و تنظیم فشار اسمزی ایفا می‌کند. این عنصر همچنین در افزایش مقاومت گیاهان به بیماری‌ها و استرس‌های محیطی مؤثر است (Mc Lean & Watson, 1985). پتاسیم در خاک به چهار شکل شامل: محلول در آب، تبدلی، غیرتبدالی و ساختمانی وجود دارد. پتاسیم محلول و تبدالی به‌طور مستقیم در دسترس گیاهان قرار دارند، در حالی که پتاسیم غیرتبدالی به تدریج و تحت تأثیر فرآیندهای شیمیایی و فعالیت میکروبی خاک به شکل قابل استفاده تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه قابلیت استفاده پتاسیم برای گیاهان به فرم شیمیایی و چگونگی توزیع آن در خاک بستگی دارد، اطلاعات دقیق از توزیع مکانی پتاسیم قابل استفاده به کشاورزان و متخصصان خاک کمک می‌کند تا راهبردهای مؤثر و برنامه‌ریزی دقیقی در مدیریت تغذیه گیاهان اتخاذ کنند (Mallarino & Wittry, 2000). در این راستا، روش‌های زمین‌آمار از جمله تخمین‌گرهای غیرپارامتری مانند میانگین متحرک وزنی و روش‌های پارامتری نظیر کریجینگ و کوکریجینگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها به دلیل در نظر گرفتن فاصله بین نقاط نمونه‌برداری، ناهمسانگردی و همبستگی مکانی داده‌ها، از اهمیت ویژه‌ای در تحلیل پراکنش داده‌های خاکی برخوردار بوده و برآوردهای دقیق‌تری از ویژگی مورد مطالعه ارائه می‌دهند (Webster & Oliver, 2007). با این حال، تراکم نمونه‌برداری تأثیر مستقیم بر دقت برآوردهای مکانی دارد.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که استفاده از فاصله‌های زیاد بین نقاط نمونه‌برداری ممکن است باعث از دست رفتن اطلاعات مکانی مهم و کاهش دقت پیش‌بینی‌ها شود (Dash et al., 2024). نمونه‌برداری با تراکم بسیار بالا نیز می‌تواند منجر به هدررفت منابع و افزایش هزینه‌ها شود. بنابراین انتخاب تراکم مناسب نمونه‌برداری با توجه به ساختار مکانی ویژگی‌های خاک و محدودیت‌های عملی، به بهینه‌سازی منابع و افزایش کارایی کمک می‌کند. مالارینو و ویتتری

(Mallarino & Wittry, 1997)، گزارش نمودند که فاصله بیشتر از ۸/۰ هکتار برای بررسی تغییرات مکانی پتاسیم در مزارع مناسب نیست. مطالعاتی در ایالت آیووا نشان داد که استفاده از شبکه‌بندی سیستماتیک با فاصله تقریباً ۱۳۵ متر، برای نمونه‌برداری پتاسیم قابل استفاده مناسب است و می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند (Mallarino, 2001). همچنین، داش و همکاران (Dash et al., 2024)، در مطالعه‌ای گزارش دادند که تراکم‌های نمونه‌برداری کمتر از ۲۴ نمونه در هر ۱۰۰۰ کیلومتر مربع منجر به نتایج پرنویز و ناپایدار شدند، اما با افزایش تراکم، نیم‌واریوگرام‌ها پایدارتر شده و برازش مدل بهبود می‌یابد. با این حال، پس از رسیدن به تراکم حدود ۴۸ نمونه در هر ۱۰۰۰ کیلومتر مربع، این بهبود کاهش می‌یابد. هان و همکاران (Han et al., 1994)، نتیجه گرفتند که اندازه بهینه واحد نمونه‌برداری به میزان تغییرپذیری مکانی بستگی دارد و بنابراین طرح بهینه نمونه‌برداری در میان مزارع مختلف متفاوت خواهد بود.

با وجود اهمیت پتاسیم قابل استفاده در خاک‌های زراعی، هنوز اطلاعات کافی درباره توزیع مکانی آن و اثر فاصله نمونه‌برداری بر دقت نقشه پتاسیم قابل استفاده در دشت شهرکرد در دسترس نیست. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی پتاسیم قابل استفاده و نقش فاصله نمونه‌برداری بر دقت و کارایی نقشه، در خاک‌های زراعی دشت شهرکرد انجام شد.

مواد و روش‌ها

دشت شهرکرد با کاربری زراعی با مساحت ۲۱۴۰۰ هکتار بین طول‌های جغرافیایی $29^{\circ} 40' 50''$ تا $29^{\circ} 15' 59''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ} 30' 8''$ تا $32^{\circ} 33' 8''$ شمالی قرار گرفته است. این منطقه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد می‌باشد. به استناد آمار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرکرد، میانگین دما در گرم‌ترین ماه سال (تیر ماه) $24/6^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد و در سردترین ماه سال (دی ماه) بین 0° تا -4° درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه در این منطقه ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. رژیم حرارتی خاک منطقه مزیک و رژیم رطوبتی آن زریک است. همچنین، بخش اعظم دشت شهرکرد به‌واسطه‌ی زمین‌های حاصلخیز، تحت کشت قرار دارد و کاربری عمده‌ی اراضی موجود در این منطقه، کشت آبی گندم، یونجه، ذرت و سیب‌زمینی می‌باشد. در این پژوهش، ۱۲۰ نمونه خاک به‌روش نمونه‌برداری شبکه‌بندی منظم (با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3) با فواصل ۱۳۳۵ متر، از دشت شهرکرد (شکل ۱) از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشته شد. پس از نمونه‌برداری، خاک‌ها به آزمایشگاه منتقل گردید و پس از هواخشک کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها با عصاره‌گیر استات آمونیوم ۱ مولار در pH خنثی (Knudsen

(et al., 1982) تعیین شد.

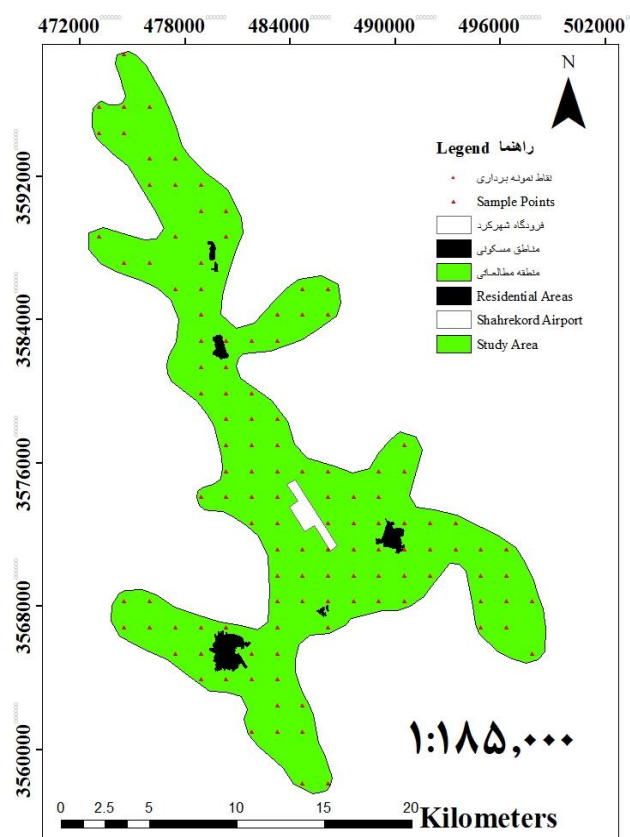
برای دستیابی به خلاصه‌ای از ویژگی‌های آماری پتاسیم قابل استفاده، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار Statistica 8 انجام شد. توصیف آماری داده‌ها، شامل حداقل، حداکثر، میانگین، میانه، ضریب تغییرات و چولگی برای متغیر تعیین گردید. همچنین، نرمال بودن توزیع داده‌ها به وسیله هیستوگرام آنها و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد.

تجزیه و تحلیل الگوی ساختار تغییرات مکانی پتاسیم قابل استفاده از طریق محاسبات واریوگرام انجام شد. بدین منظور از نرم‌افزار GS+ استفاده گردید. در ابتدا، واریوگرام تجربی پتاسیم قابل استفاده ترسیم و سپس همسانگردی یا ناهمسانگردی آن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به عدم مشاهده ناهمسانگردی، تغییرنمای همه‌جهته برای پتاسیم قابل استفاده رسم گردید. پس از محاسبه واریوگرام تجربی، مدل‌های نظری مختلف بر آن برازش داده شد. سپس، پارامترهای تغییرنما و کلاس وابستگی مکانی متغیر، مشخص گردید. برای تعیین کلاس

وابستگی مکانی، از نسبت واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس آستانه استفاده شد که معمولاً به صورت درصدی از واریانس کل بیان می‌شود (Camberdella et al., 1994). اگر این مقدار کمتر از ۲۵ درصد باشد، متغیر دارای وابستگی مکانی قوی و اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد، وابستگی مکانی متوسط و در صورتی که بیشتر از ۷۵ درصد باشد، وابستگی مکانی مقادیر متغیر مورد نظر ضعیف است. پس از تعیین پارامترهای واریوگرام، اعتبارسنجی مدل‌های تغییرنما از طریق تنظیم پارامترهای اولیه به‌گونه‌ای انجام شد که مدل نهایی بهینه دارای میانگین خطا (ME) نزدیک به صفر و حداقل میانگین مربعات خطا (MSE) باشد. این شاخص‌ها به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(X_i) - Z^*(X_i)]$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(X_i) - Z^*(X_i)]^2$$



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری در دشت شهرکرد

Figure 1- Location of sampling points in the Shahrekord Plain

جدول ۱- خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک

Table 1- Summary statistics of measured soil properties

ویژگی خاک	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	میان	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی
Soil property	Unit	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard deviation	Coefficient of variation	Skewness
پتاسیم قابل استفاده	میلی گرم بر کیلوگرم	120	812	341	310	130.2	38.2	1.25
Available Potassium	mg kg ⁻¹						(%)	

که، $Z(X_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر در موقعیت X_i ، $Z^*(X_i)$ مقدار برآورد شده متغیر مورد نظر در همان موقعیت و N تعداد مشاهدات است. در ادامه، برای تهیه نقشه‌های پتاسیم قابل استفاده، از روش کریجینگ معمولی و نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استفاده شد. روش تخمین آماری کریجینگ بر مبنای متحرک وزن‌دار استوار است و به‌عنوان بهترین تخمین‌گر ناربیب شناخته شده است. این تخمین‌گر با استفاده از فرمول ارائه شده توسط کریج (Krige, 1951)، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

که در آن، λ_i وزن کمیت وابسته به نمونه z_i و Z مقدار متغیر مورد نظر در نمونه z_i است.

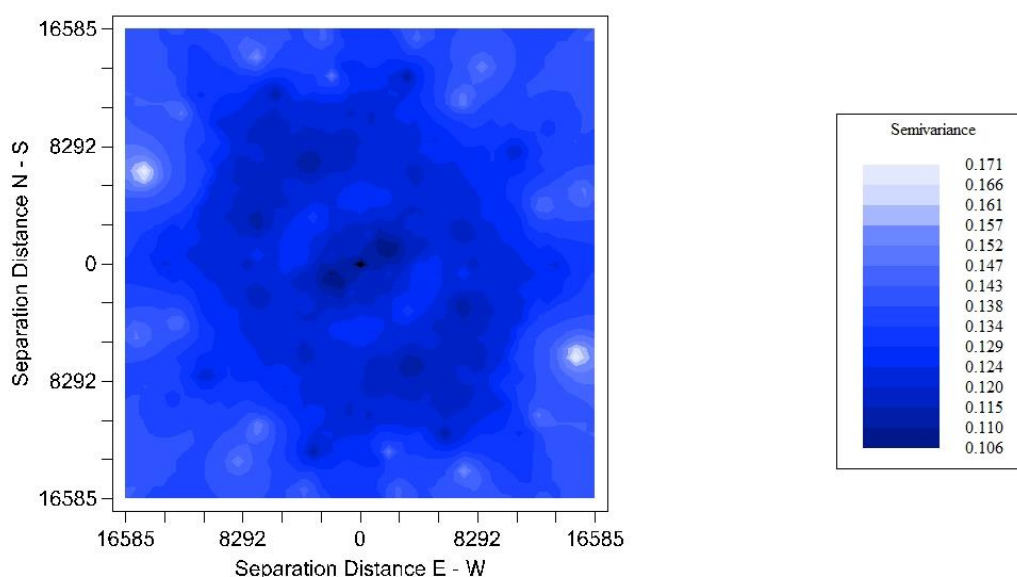
نتایج و بحث

خلاصه آماری پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها، در جدول ۱ نشان داده شده است. دامنه تغییرات پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها از ۱۲۰ تا ۸۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و میانگین آن ۳۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. ضریب تغییرات پتاسیم قابل استفاده در خاک‌ها برابر با ۳۸/۲ درصد است که نشان‌دهنده تغییرپذیری نسبتاً زیاد این عنصر در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. ضریب تغییرات بالای پتاسیم قابل استفاده، می‌تواند نشان‌دهنده تنوع در نوع و مقدار کودهای پتاسه مصرف‌شده و همچنین تفاوت در نحوه توزیع آن‌ها در سطح مزرعه باشد (Dobermann, 1994). چولگی داده‌ها برابر با ۱/۲۵ است، که بیانگر توزیع نامتقارن و متمایل به سمت راست داده‌ها می‌باشد؛ به‌منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌های مربوط به پتاسیم قابل استفاده، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. پتاسیم قابل استفاده در خاک، پس از تبدیل لگاریتمی داده‌ها دارای توزیع نرمال شد.

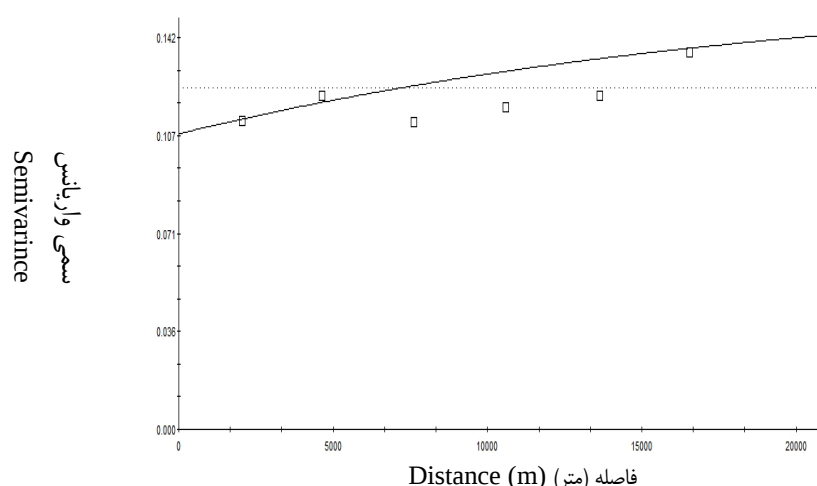
چنانچه شدت و چگونگی تغییرپذیری مکانی مقادیر یک متغیر فاقد وابستگی به جهات جغرافیایی باشد، آن تغییرپذیری را همسانگرد و در غیر این صورت، ناهمسانگرد گویند. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به تقارن نسبی واریوگرام سطحی در جهات مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که پیوستگی مکانی متغیر مورد بررسی در راسه‌های مختلف مشابه بوده و بنابراین، تغییرپذیری مکانی آن همسانگرد در نظر گرفته شد (Webster & Oliver, 2007).

نیم‌تغییرنمای برازش داده شده بر پتاسیم قابل استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل نمایی بهترین برازش را با داده‌ها داشته و تغییرپذیری مکانی پتاسیم قابل استفاده را در این خاک‌ها توصیف می‌کند. مدل نمایی به‌دلیل افزایش تدریجی نیم‌تغییرنما و نزدیک شدن مجانبی آن به مقدار سیل (آستانه واریانس)، قادر است تغییرپذیری مکانی تدریجی را در فواصل مختلف به‌خوبی توصیف کند (Webster & Oliver, 2007). بلانچت و همکاران (Blanchet et al., 2017) گزارش نمودند که پتاسیم قابل استفاده در خاک‌های کانتون فریبورگ در سوئیس با مدل نمایی توصیف شد. همچنین، نتایج شعبانی و دلاور (Shabani & Delavar, 2016)، نشان داد که مدل نمایی بهترین برازش را برای پتاسیم قابل استفاده خاک داشته است.

جدول ۲، نتایج پارامترهای تغییرنمای پتاسیم قابل استفاده خاک را نشان می‌دهد. یکی از این پارامترها، اثر قطعه‌ای است که ناشی از خطاهای نمونه‌برداری صحرائی، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا تغییرپذیری مکانی در فواصل کوتاه‌تر از کوچک‌ترین فاصله بین نقاط نمونه‌برداری می‌باشد، این اثر، ۰/۱۰۸ و دامنه تأثیر آن، ۵۳۳۰۰ متر می‌باشد. ایزاکس و سریواستاوا (Isaaks & Srivastava, 1989)، بیان نمودند که فاصله نمونه‌برداری باید ۰/۲۵ برابر دامنه تغییرپذیری مکانی باشد تا شبکه نمونه‌برداری بتواند تغییرات مکانی را به‌طور مؤثر پیش‌بینی کند. براین‌اساس، با توجه به دامنه مؤثر ۵۳۳۰۰ متر، فاصله نمونه‌برداری مناسب حداکثر ۱۳۳۲۵ متر خواهد بود. از آنجاکه فاصله نمونه‌برداری واقعی در این پژوهش، ۱۳۳۵ متر است که تقریباً ۱۰ برابر کمتر از مقدار توصیه‌شده می‌باشد، بنابراین، تراکم نمونه‌برداری کافی است و انتظار می‌رود تغییرات مکانی پتاسیم قابل استفاده با دقت بالاتری برآورد شوند.



شکل ۲- تغییرنمای سطحی پتاسیم قابل استفاده خاک
Figure 2- Surface map of soil available potassium



شکل ۳- واریوگرام‌های تجربی به همراه مدل نظری برازش داده شده پتاسیم قابل استفاده خاک
Figure 3- Experimental variograms with fitted theoretical models for soil available potassium

تغییرات مدیریتی شدید خاک نظیر الگوهای متفاوت مصرف کود، تناوب زراعی و سابقه بهره‌برداری زمین نیز قرار گیرد. این عوامل موجب افزایش تغییرپذیری در فواصل کوتاه و تضعیف الگوی مکانی منظم می‌شوند (Mallarino, 1996; Sen et al., 2007).

وانگ و همکاران (Wang et al., 2009) تغییرپذیری مکانی و عوامل مؤثر بر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ماده آلی خاک در زمین‌های زراعی شمال‌شرق چین را بررسی کردند. در این مطالعه، ۳۵۲ نمونه به روش تصادفی از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر و با مساحت ۳۴۳۵ کیلومتر

شکل تقریباً خطی واریوگرام نمایی ناشی از آن است که در این مدل، نیم‌واریانس در فواصل کوتاه نسبت به دامنه تغییرپذیری تقریباً رابطه‌ای خطی با فاصله دارد (Isaaks & Srivastava, 1989). بنابراین، به دلیل کوچک بودن فاصله نمونه‌برداری نسبت به دامنه مؤثر، بیشتر داده‌ها در بخش ابتدایی تابع نمایی قرار گرفته‌اند و واریوگرام تجربی به صورت تقریباً خطی مشاهده شده است (Webster & Oliver, 2007). با این حال، باید توجه داشت که شکل خطی واریوگرام می‌تواند علاوه بر محدودیت‌های ناشی از ساختار مدل، تحت تأثیر

مربع جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که داده‌های لگاریتمی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ماده آلی خاک از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. واریوگرام تجربی داده‌های لگاریتمی ماده آلی، نیتروژن کل و فسفر قابل استخراج با مدل نمایی برازش داده شد، در حالی که پتاسیم قابل استخراج با مدل کروی برازش شد. دامنه مؤثر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ماده آلی خاک به ترتیب ۲۱۱، ۴۹/۳، ۲/۹ و ۱۲۳/۱ کیلومتر بود.

رادوجاج و همکاران (Radocaj et al., 2021)، به بررسی تأثیر تراکم نمونه‌برداری خاک بر دقت درون‌یابی پتاسیم خاک در اراضی زراعی به وسعت ۸۲۳/۴ هکتار با ۱۶۰ نمونه خاک به روش تصادفی طبقه‌بندی شده در شهرستان اوسیک-بارانیا کرواسی، پرداختند. نتایج نشان داد که تراکم نمونه‌برداری بیشترین تأثیر را بر دقت درون‌یابی دارد و کاهش تعداد نمونه‌ها کمتر از ۳۷/۵ درصد از کل مجموعه، باعث کاهش قابل توجه دقت شد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2024)، به بررسی تغییرات مکانی و زمانی پتاسیم قابل استفاده در منطقه کارستی جنوب‌غربی چین پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از تحلیل نیم‌واریوگرام، به شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات پتاسیم قابل استفاده و تعیین فاصله‌های نمونه‌برداری مناسب پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که فاصله نمونه‌برداری باید کمتر از ۵ کیلومتر باشد تا تغییرات پتاسیم قابل استفاده به‌طور مؤثر شبیه‌سازی شوند.

میزان وابستگی متغیرها، با استفاده از نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه به‌دست می‌آید که مقادیر کوچکتر از ۲۵ درصد نشان‌دهنده‌ی وابستگی مکانی قوی، ۲۵ تا ۷۵ درصد متوسط و بیش از ۷۵ درصد ضعیف می‌باشد (Camberdella et al., 1994). براین اساس، درصد وابستگی مکانی برای متغیر مورد مطالعه، ۵۰/۲ درصد است که در کلاس وابستگی مکانی متوسط قرار می‌گیرد. قرار گرفتن درصد وابستگی مکانی پتاسیم قابل استفاده در کلاس متوسط نشان‌دهنده‌ی تأثیر همزمان عوامل درونی، مانند؛ ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و عوامل بیرونی نظیر فعالیت‌های مدیریتی (نحوه کوددهی، الگوی زراعی، تردد ماشین‌آلات) بر پراکنش مکانی این ویژگی می‌باشد. رضا و همکاران (Reza et al., 2019)، گزارش کردند که تحلیل‌های ژئواستاتیستیک نشان داد برای پتاسیم مدل نمایی بهترین برازش را

دارد و این عنصر در خاک از وابستگی مکانی ضعیفی برخوردار است. همچنین، نقشه توزیع مکانی پتاسیم بیانگر الگوی پراکندگی ناهمگون بوده و نشان می‌دهد که برای مدیریت کود پتاسیم در کشاورزی دقیق، لازم است نرخ مصرف کود متناسب با تغییرات مکانی این عنصر تنظیم شود. نتایج وانگ و همکاران (Wang et al., 2009)، نشان داد که نیتروژن کل، فسفر قابل استخراج و پتاسیم قابل استخراج دارای وابستگی مکانی متوسط بودند، در حالی که مواد آلی خاک وابستگی مکانی ضعیفی داشت.

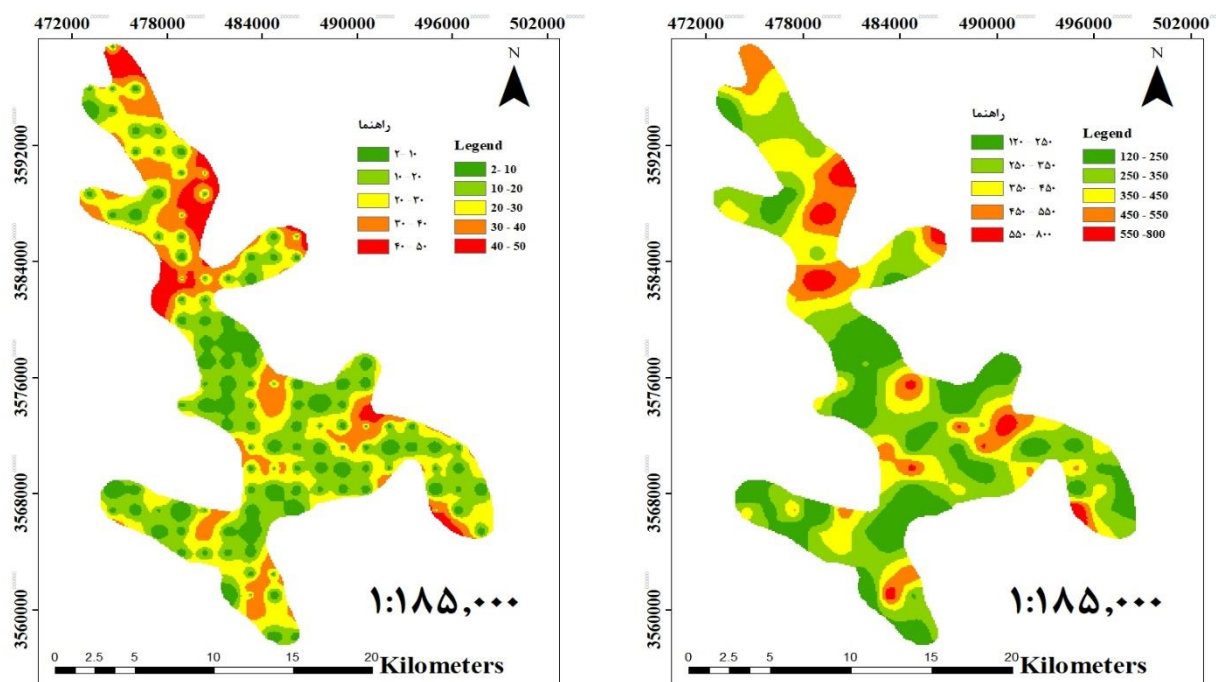
میانگین خطای تخمین لگاریتم پتاسیم قابل استفاده برابر با ۰/۰۰۸ -، میانگین مربعات خطای تخمین برابر با، ۰/۰۱۱ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۱۰۵ بود که بیانگر ناریب بودن و دقت بالای تخمین می‌باشد. نقشه پهنه‌بندی پتاسیم قابل استفاده و خطای پیش‌بینی در شکل ۴ نشان داده شده است. نقشه پهنه‌بندی پتاسیم قابل استفاده نشان داد که ۴۹۹۴ هکتار از اراضی دارای پتاسیم قابل استفاده بین ۱۲۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۸۰۲۵ هکتار از اراضی بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۵۱۷۱ هکتار از اراضی بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۱۶۰۵ هکتار از اراضی بین ۴۵۰ تا ۵۵۰ و ۱۶۰۵ هکتار از اراضی بین ۵۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشند. اراضی با مقادیر کمتر از ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم یا بیش از ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بخش‌های کوچک و پراکنده‌ای از منطقه دیده شد. این پراکنش موضعی بیانگر تغییرپذیری محلی خاک و احتمالاً بازتابی از تأثیر مدیریت زراعی بر وضعیت پتاسیم خاک است.

نقشه کریجینگ پتاسیم قابل استفاده در مقیاس ۱:۱۸۵۰۰۰ برای شناسایی الگوهای کلی مکانی و پهنه‌بندی‌های وسیع مفید است، اما دقت آن برای توصیه‌های مزرعه‌ای محدود بوده و برای کاربردهای دقیق‌تر، نیاز به افزایش تراکم نمونه‌برداری و استفاده از مقیاس‌های بزرگ‌تر است. نتایج بیانگر اهمیت مطالعات تفصیلی و تراکم بالای نمونه برداری (فواصل کم نمونه‌ها) در تولید و نقشه‌های مدیریت پذیر خاک با مقیاس بزرگ است.

جدول ۲- پارامترهای تغییرنمای پتاسیم قابل استفاده خاک

Table 2- Parameters of spatial variability of soil available potassium

ویژگی خاک	اثر قطعه‌ای	دامنه تأثیر	حد آستانه	مدل	ضریب وابستگی	ضریب تبیین	مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها	کلاس وابستگی مکانی
Soil property	Nugget	Range (m)	Sill	Function	Dependency coefficient (%)	r ²	RSS	Spatial Dependency Class
لگاریتم پتاسیم قابل استفاده	0.108	53300	0.218	نمایی	50.2	0.48	2.58×10 ⁻⁴	متوسط
Available Potassium				Exponential				Medium



(الف) (ب)

شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی پتاسیم قابل استفاده (الف) و خطای تخمین پتاسیم قابل استفاده (ب)

Figure 4- Zonation map of soil available potassium (a) and estimation error of available potassium (b)

نتیجه‌گیری

عامل اصلی تعیین‌کننده اثربخشی تراکم نمونه‌برداری خاک، ناهمگنی ذاتی خاک است که خود متأثر از مدیریت محصول و حاصلخیزی خاک است. با این وجود، در مزارع نسبتاً همگن، تعداد کمتری نمونه برای ارزیابی دقیق ویژگی‌های خاک لازم است، در حالی که در محیط‌های ناهمگن‌تر، نمونه‌برداری با تراکم بالاتر برای بازنمایی صحیح ویژگی‌های خاک ضروری است. با وجود اینکه تراکم نمونه‌برداری انتخاب شده کمتر از آن است که تمام جزئیات تغییرات مکانی پتاسیم قابل استفاده در دشت شهرکرد را ثبت کند، نقشه‌های

حاصل از روش کریجینگ دقت قابل قبولی دارند. این امر علی‌رغم افزایش تغییرپذیری در فواصل کوتاه و کاهش الگوی مکانی منظم ناشی از تغییرات مدیریتی شدید خاک، مانند الگوهای متفاوت مصرف کود، تناوب زراعی و سابقه بهره‌برداری، حاصل شده است؛ بنابراین، حتی با تراکم نمونه کمتر، مدل کریجینگ توانسته است الگوی کلی پتاسیم قابل استفاده را با دقت قابل قبول پیش‌بینی کند. با این حال، برای مطالعات آینده توصیه می‌شود اثر تراکم نمونه‌برداری در فواصل کمتر مورد بررسی قرار گیرد تا حساسیت مدل و دقت نقشه‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر مشخص شود.

References

1. Blanchet, G., Libohova, Z., Joost, S., Rossier, N., Schneider, A., Jeangros, B., & Sinaj, S. (2017). Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland. *Geoderma*, 290, 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.002>
2. Camberdella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., & Konopka, A.E. (1994). Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1501-1511.
3. Dobermann, A. (1994). Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. *Geoderma*, 62(1-3), 125-150.
4. Dash, P.K., Miller, B.A., Panigrahi, N., & Mishra, A. (2024). Exploring the effect of sampling density on spatial prediction with spatial interpolation of multiple soil nutrients at a regional scale. *Land*, 13(10), 1615. <https://doi.org/10.3390/land13101615>
5. Han, S., Hummel, J.W., Goering, C.E., & Cahn, M.D. (1994). Cell size selection for site-specific crop management. *Transactions of the ASAE*, 37(1), 19-26.

6. Isaaks, E.H., & Srivastava, R.M. (1989). *Applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 561 p.
7. Knudsen, D., Peterson, G.A., & Pratt, P.F. (1982). Lithium, sodium and potassium. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. (2nd ed.). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 225-246.
8. Krige, D.G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6), 119-139.
9. Li, J., & Heap, A.D. (2008). A review of spatial interpolation methods for environmental scientists.
10. Mallarino, A.P. (1996). Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5), 1473-1481.
11. Mallarino, A., & Wittry, D. (1997). Use of DGPS, yield monitors, soil testing, and variable rate technology to improve phosphorus and potassium management.
12. Mallarino, A.P., & Wittry, D.J. (2000). Identifying cost-effective soil sampling schemes for variable-rate fertilization and liming.
13. Mallarino, A. (2001). Management zones soil sampling: A better alternative to grid and soil type sampling?
14. Mc Lean, E.O., & Watson, M.E. (1985). Soil measurements of plant-available potassium. *Potassium in Agriculture*, 277-308.
15. Reza, S.K., Ray, P., Ramachandran, S., Bandyopadhyay, S., Mukhopadhyay, S., Sah, K.D., ... & Ray, S.K. (2019). Spatial distribution of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents and stocks in humid subtropical North-eastern India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 67(1), 12-20. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2019.00002.1>
16. Radocaj, D., Jug, I., Vukadinovic, V., Jurisic, M., & Gasparovic, M. (2021). The effect of soil sampling density and spatial autocorrelation on interpolation accuracy of chemical soil properties in arable cropland. *Agronomy*, 11(12), 2430. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122430>
17. Sahrawat, K.L., Rego, T.J., Wani, S.P., & Pardhasaradhi, G. (2008). Stretching soil sampling to watershed: Evaluation of soil-test parameters in a semi-arid tropical watershed. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(19-20), 2950-2960. <https://doi.org/10.1080/00103620802432857>
18. Sen, P., Majumdar, K., & Sulewski, G. (2007). Spatial variability in available nutrient status in an intensively cultivated village. *Better crops*, 91(2), 10-11.
19. Shabani, H., & Delavar, M.R. (2016). Assessment of macronutrients spatial variability in the lands of University of Zanjan. *Journal of Agriculture*, 110, 75-82. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/aj.2016.109332>
20. Wang, Z.M., Song, K.S., Zhang, B., Liu, D.W., Li, X.Y., Ren, C.Y., ... & Zhang, C.H. (2009). Spatial variability and affecting factors of soil nutrients in croplands of Northeast China: a case study in Dehui County. *Plant Soil Environment*, 55(3), 110-120.
21. Webster, R., & Oliver, M.A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.
22. Zhang, W., Zhang, Y., Zhang, X., Wu, W., & Liu, H. (2024). The spatiotemporal variability of soil available phosphorus and potassium in Karst Region: The crucial role of socio-geographical factors. *Land*, 13(6), 882. <https://doi.org/10.3390/land13060882>