

Evaluating the Spatial Variability of Soil Quality in a Corn Field in Ravansar, Kermanshah Province

Amir Rezaei¹ , Aliashraf Amirinejad² 

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

E-mail: amirrh57@gmail.com

2-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

E-mail: aliamirinejad@gmail.com

Received: August 16, 2025

Revised: October 23, 2025

Accepted: October 23, 2025

Published: October 28, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

The spatial variability of soil properties in agricultural fields, in addition to pedological and geological factors, is influenced by various management practices. Awareness of these changes is important for sustainable soil and crop management. To evaluate sustainable management in agricultural lands, understanding soil quality is particularly important. In other words, soil quality classification systems play a crucial role in assessing agricultural production on farms. Over the last few decades, the spatial variability of soil properties has been investigated using geographic information systems (GIS) and geostatistical methods to interpolate soil properties. Zoning the main soil physical parameters is essential for identifying areas with physical problems and carrying out corrective measures at minimal cost to increase crop production. Although research has been conducted on zoning soil characteristics or evaluating soil spatial variability in wheat, rapeseed, and rice farms, no comprehensive studies have been carried out on the physical quality of soil in corn fields. Therefore, this study was conducted to investigate the relationship between soil physical quality and the biological yield of corn in a 45-hectare farm.

Materials and Methods

To investigate soil quality, a large corn field with an area of 45 hectares was selected in Ravansar, Kermanshah province, Iran. Using geostatistical techniques and ArcGIS-9.2 software, the spatial variability of five soil parameters affecting crop yield including bulk density (BD), non-capillary porosity (NCP), saturated hydraulic conductivity (Ks), available water capacity (AWC), and organic carbon (OC), was evaluated on a regular grid (100 m × 100 m). The kriging method was employed to investigate the spatial variations of soil properties. The appropriate interpolation model was selected based on the root mean square error (RMSE) and the coefficient of determination (r^2). Due to the flatness of the land and the considerable depth of the underground water, the values of the five aforementioned parameters were used to calculate the physical rating index (PRI). The PRI at each sampling point was determined by multiplying the values of these parameters. Subsequently, the relationship between this index and the biological yield of corn was investigated. SPSS-18 software was used for statistical analysis of the data. Data normalization was performed using square root and logarithmic transformations, along with the Kolmogorov-Smirnov test.

Results

The results revealed that major ranges of semivariogram for Ks and AWC varied between 137–145 m and for BD, OC and NCP they were relatively long (161–205 m). The range of all the investigated soil

characteristics was greater than the sampling distance, indicating that the considered distances were sufficient to represent the spatial variations of the characteristics. The best spatial structure model with the highest accuracy was exponential model for Ks, NCP, and OC, and spherical model for BD and biological yield of corn. Examining the zoning maps showed that the values of Ks, OC, BD, NCP, and AWC varied from 0.006 to 3 cm/h, 0.2 to 1.32%, 1.35 to 1.8 g/cm³, 3.5 to 17.3%, and 4.24 to 16.63%, respectively. The results also revealed that the spatial structure of non-capillary porosity and clay was medium, while the others were weak. Because the semivariogram exhibited similar spatial continuity in all directions, all the variables were isotropic and not affected by external factors. According to the bulk density zoning map, approximately 60% of the soils are dense, with a density of more than 1.6 g/cm³. In other words, the density of the subsurface layer limits the development of plant roots in the soil, resulting in reduced crop production. Areas with a Ks value of less than 0.1 cm/h cover approximately 40% of the northern part of the region. Additionally, only about 10% of the farm has good soil available water, while around 45% of the area faces severe to very severe moisture problems. Finally, the correlation between PRI and the biological yield of corn was strong ($r = 0.8832^{**}$)

Conclusion

By examining the correlation between the PRI and crop yield, useful information can be obtained to identify areas with inappropriate soil physical quality in a corn field. In other words, using geostatistical methods is an important step toward investigating the spatial variability of soil characteristics and improving soil physical quality. Therefore, it can be stated that the PRI is an important parameter for assessing soil quality to enhance physical conditions and increase crop yield. In general, by preparing zoning maps of the PRI index and biological yield with the help of geostatistics, the soil physical quality in any part of the farm can be identified and improved.

Key words: Biological yield, Corn, Geostatistics, Physical rating index, Soil quality.

Author Contributions

Conceptualization, Aliashraf Amirinejad; methodology, Amir Rezaei and Aliashraf Amirinejad; software, Amir Rezaei; writing-original draft preparation, Amir Rezaei, writing-review and editing Aliashraf Amirinejad; project administration, Aliashraf Amirinejad. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Rezaei, A. & Amirinejad, A. (2025). Evaluating the spatial variability of soil quality in a corn field in Ravansar, Kermanshah province. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(3), 95–110.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.69189.1021>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN  ACCESS
JOURNALS



مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات مکانی کیفیت خاک در یک مزرعه ذرت در منطقه روانسر استان کرمانشاه

امیر رضایی^۱ , علی اشرف امیری نژاد^۲ 

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: amirrk57@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

رایانامه: aliamirinejad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

چکیده

سامانه‌های طبقه‌بندی کیفیت خاک، در بهره‌برداری صحیح از این منبع مهم طبیعی، ارزیابی تولید محصولات کشاورزی در مزارع و مدیریت پایدار اراضی کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارند. برای بررسی کیفیت خاک، یک مزرعه بزرگ ذرت (Zea mays L.) به مساحت ۴۵ هکتار در منطقه روانسر استان کرمانشاه انتخاب شد. با استفاده از علم زمین‌آمار و ۶۵ نمونه، تغییرات مکانی پنج شاخص مؤثر بر تولید محصول شامل جرم مخصوص ظاهری، تخلخل غیرموییگی، هدایت هیدرولیکی اشباع، گنجایش آب قابل جذب گیاه و کربن آلی خاک در یک شبکه منظم به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر مربع در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارزیابی شد. با حاصلضرب ارزش پنج شاخص مذکور، شاخص رتبه‌بندی فیزیکی در نقاط نمونه‌برداری تعیین و سپس ارتباط این شاخص با عملکرد بیولوژیک ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد که دامنه تأثیر نیم‌تغییرنا (سمی‌واریوگرام) برای شاخص‌های هدایت هیدرولیکی اشباع و گنجایش آب قابل جذب گیاه بین ۱۳۷ تا ۱۴۵ متر و برای شاخص‌های جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی و تخلخل غیرموییگی به نسبت بلند (۱۶۱ تا ۲۰۵ متر) بودند. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی نشان داد که مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع بین ۰/۰۰۶ تا ۳ سانتی‌متر بر ساعت، کربن آلی بین ۰/۲ تا ۱/۳۲ درصد، جرم مخصوص ظاهری بین ۱/۳۵ تا ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تخلخل غیرموییگی بین ۳/۵ تا ۱۷/۳ درصد و گنجایش آب قابل جذب گیاه بین ۴/۲۴ تا ۱۶/۶۳ درصد متغیر بودند. همچنین، همبستگی بین شاخص رتبه‌بندی فیزیکی و عملکرد بیولوژیک ذرت خیلی خوب بود ($r^2 = 0.8832^{**}$). به‌طور کلی، با تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص رتبه‌بندی فیزیکی خاک و عملکرد بیولوژیک به کمک علم زمین‌آمار، می‌توان کیفیت فیزیکی خاک هر نقطه از مزرعه را شناسایی و اصلاح نمود.

واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، رتبه‌بندی فیزیکی، ذرت، عملکرد بیولوژیک، کیفیت خاک

استناد به این مقاله: رضایی، ا. و امیری نژاد، ع.ا. (۱۴۰۴). بررسی تغییرات مکانی کیفیت خاک در یک مزرعه ذرت در منطقه روانسر استان کرمانشاه. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۳)، ۹۵-۱۱۰.

مقدمه

آگاهی از کیفیت خاک، لازمه بهره‌برداری صحیح از این منبع مهم طبیعی، در راستای کشاورزی پایدار است. کیفیت خاک با اندازه‌گیری بعضی شاخص‌های مهم تعیین می‌شود. اگر این شاخص‌ها در محدوده مناسب قرار داشته باشند، عملکرد محصول به حداکثر مقدار رسیده و تخریب خاک نیز کاهش می‌یابد (Castellini *et al.*, 2019). تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک در مزارع کشاورزی، علاوه بر عوامل پدولوژیک و زمین‌شناخت، ممکن است تحت تأثیر بعضی عوامل انسانی و مدیریتی مانند شخم زمین انجام شود (Aruna *et al.*, 2016). آگاهی از این تغییرات در راستای مدیریت پایدار خاک و محصول حائز اهمیت است. به عبارت دیگر، برای ارزیابی مدیریت پایدار اراضی کشاورزی، شناخت کیفیت خاک اهمیت ویژه‌ای دارد (Amirinejad *et al.*, 2010). در کشاورزی، کیفیت خاک بیانگر توان تولید خاک برای رشد و عملکرد محصول بوده و در راستای مدیریت زمین است. امروزه مفهوم کیفیت فیزیکی خاک با تعیین بعضی شاخص‌ها به صورت کمی در آمده تا بتوان سطح کیفیت خاک را تعیین کرد. در خاک‌های کشاورزی، برخی از مهمترین شاخص‌های کیفیت فیزیکی شامل ظرفیت آب قابل استفاده گیاه، ظرفیت هوای خاک، تخلخل، جرم مخصوص ظاهری و مقدار کربن آلی اجزای اصلی شاخص پایداری خاک هستند. این شاخص‌ها توانایی خاک در ذخیره و تأمین آب، هوا و مواد غذایی ضروری محصول را نشان می‌دهند (Gulser *et al.*, 2016).

در چند دهه اخیر، موضوع بررسی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نیز کاربرد روش‌های زمین‌آمار برای میان‌یابی و تخمین دقیق ویژگی‌های خاک، اهمیت ویژه‌ای داشته است. با بکارگیری سامانه مذکور و تلفیق نقشه‌های مکانی مختلف خاک، می‌توان با کسب اطلاعات تازه، یک راهکار مناسب در جهت بهبود شرایط فیزیکی و قابلیت تولید خاک اتخاذ کرد (Zulfikar Khan *et al.*, 2021). (Gulser *et al.*, 2016) در بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های فیزیکی خاک یک زمین زراعی اعلام کردند که الگوی تغییرات مکانی شن، سیلت و رس تابع جهت جغرافیایی نبوده و به عبارتی همسانگرد^۱ بودند. همچنین، ساختار مکانی بیشتر ویژگی‌های خاک نظیر هدایت هیدرولیکی و مقادیر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی قوی بوده است. آنان در ترسیم نیم‌تغییرنمای ویژگی‌های مورد بررسی خاک از مدل کروی استفاده کردند.

(Amirinejad *et al.*, 2010) شاخص سلامت فیزیکی خاک را با استفاده از بعضی شاخص‌های فیزیکی همچون هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه، جرم مخصوص ظاهری و ماده آلی خاک مطالعه و اعلام کردند که بین این شاخص خاک و عملکرد برنج و گندم همبستگی نسبتاً خوبی وجود داشت. آنان گزارش کردند که تعیین شاخص سلامت فیزیکی خاک، گامی مهم برای رسیدن به تولید پایدار محصولات زراعی است. به عقیده (Castellini *et al.*, 2019)، بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های فیزیکی خاک مزارع زیر کشت محصولات کشاورزی برای اصلاح مدیریت زمین مفید و لازم است و البته باید بین ویژگی‌های فیزیکی خاک و عملکرد محصولات کشاورزی یک همبستگی متوسط تا خوب وجود داشته باشد.

ذرت (*Zea mays* L.) گیاهی یکساله از تیره گندمیان و پس از گندم و برنج سومین غله مهم و استراتژیک جهان است. ذرت سرشار از مواد غذایی مورد نیاز بدن و منبع خوبی از فیبر و سرشار از کالری است. میزان نشاسته موجود در دانه این گیاه ۵۲ تا ۷۴ درصد و میزان پروتئین آن ۵ تا ۱۶ درصد گزارش شده است. استان کرمانشاه یکی از استان‌های مهم کشت ذرت دانه‌ای است که از لحاظ سطح زیرکشت در رتبه دوم بعد از استان خوزستان و از نظر عملکرد در واحد سطح در رتبه اول کشوری قرار دارد (Mondani *et al.*, 2021).

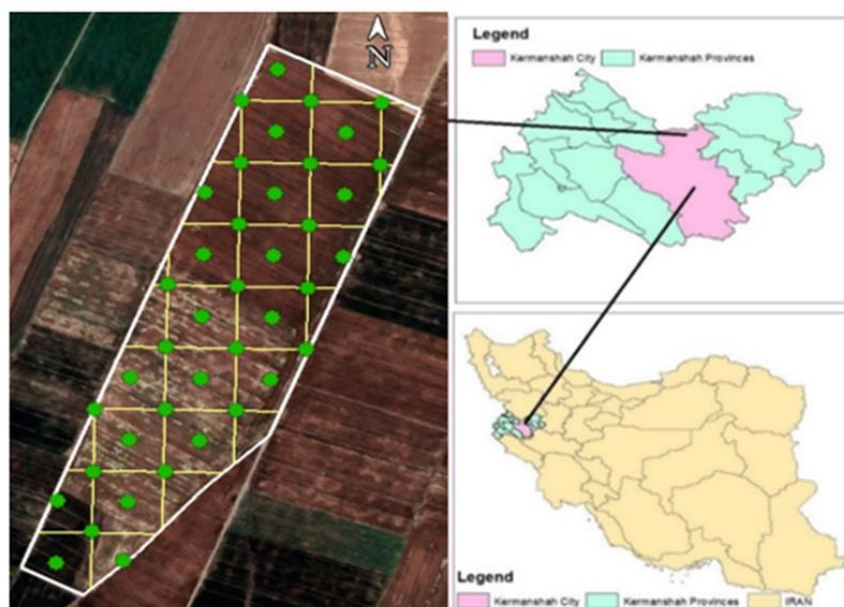
تهیه نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های اصلی فیزیکی خاک مزرعه، برای شناسایی مناطق دارای مشکلات فیزیکی و انجام اقدامات اصلاحی با حداقل هزینه در راستای افزایش میزان تولید محصولات در واحد سطح دارای اهمیت است.

¹-Isotropic

همچنین، با تهیه نقشه پهنه‌بندی عملکرد محصولات زراعی در یک منطقه می‌توان توزیع پراکندگی میزان تولید در نقاط مختلف مزرعه را ارزیابی کرد. در مورد پهنه‌بندی و ارزیابی تغییرات مکانی سلامت فیزیکی خاک مزارع گندم و برنج تحقیقاتی انجام شده است (Amirinejad et al., 2010)، اما اطلاعات جامعی در مورد ارتباط کیفیت فیزیکی خاک با عملکرد مزارع ذرت در دسترس نیست. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی تغییرات مکانی کیفیت فیزیکی خاک یک مزرعه ۴۵ هکتاری ذرت در دشت روانسر استان کرمانشاه انجام شد. پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک در یک شبکه منظم با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار و با استفاده از نرم افزار ArcGIS-9.2 انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی دشت روانسر در استان کرمانشاه به مساحت ۴۵ هکتار با مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 27' 19'' \text{ N}$ و $47^{\circ} 42' 14'' \text{ E}$ بود (شکل ۱). رده خاک منطقه اینسپتی‌سول (Inceptisols) و بافت غالب خاک سطحی، لوم رسی (Clay loam) بود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه همراه با نقاط مورد مطالعه.

از آنجا که روش نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم، معمول‌ترین شیوه در مطالعات زمین‌آمار است، بنابراین، در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از نقشه توپوگرافی، یک شبکه منظم با ابعاد 100×100 متر ایجاد و مختصات جغرافیایی ۶۵ نقطه مشاهداتی با استفاده از GPS به‌دست آمد. در هر نقطه مورد مطالعه، نمونه‌برداری خاک به صورت دست‌نخورده و بهم‌خورده از هر دو لایه سطحی (۰-۲۵ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۲۵-۵۰ سانتی‌متر) انجام شد. در آزمایشگاه ویژگی‌های فیزیکی مهم شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه (با ابعاد قطر داخلی ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵/۵ سانتی‌متر) (Jacob & Clarke, 2002)، کربن آلی خاک با روش اکسایش با دی کرومات پتاسیم (Walkley & Black, 1943) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با روش بار ثابت (Jacob & Clarke, 2002) تعیین شدند. با اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در حالت اشباع (θ_{SAT}) با روش ثقل‌سنجی (Wilcox, 1951) و مقادیر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) و رطوبت نقطه پژمردگی دایم (θ_{PWP}) با دستگاه صفحات فشاری (در

پتانسیل ماتریک به ترتیب ۳۳ و ۱۵۰۰ (kPa) (Richards & Fireman, 1943)، تخلخل غیرموییگی^۱ (NCP) و گنجایش آب قابل جذب گیاه^۲ (AWC) با استفاده از روابط زیر تعیین شدند. جدول ۱ نیز آمار توصیفی ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

$$\text{Noncapillary porosity (NCP) (\%)} = \theta_{\text{SAT}} (\% \text{V/V}) - \theta_{\text{FC}} (\% \text{V/V})$$

$$\text{Available water capacity (AWC) (\%)} = \theta_{\text{FC}} (\% \text{V/V}) - \theta_{\text{PWP}} (\% \text{V/V})$$

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه.

متغیر	Sand	Silt	Clay (%)	NCP	OC	AWC (cm/m)	BD (g/cm ³)	Ks (cm/h)
حداقل	۳۲/۵	۲۰	۳۲	۳/۵	۰/۲	۴/۲۴	۱/۳۵	۰/۰۰۶
حداکثر	۴۳	۴۳	۴۳	۱۷/۳	۱/۳۲	۱۶/۶۳	۱/۸۰	۳/۰
میانگین	۳۹/۰۷	۲۴/۰۹	۳۶/۹۱	۱۲/۹۵	۱/۰۲	۱۲/۸۱	۱/۴۰	۰/۲۹
انحراف معیار	۳/۰۱	۳/۲۹	۲/۲۶	۰/۶۷	۰/۱۵	۲/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۵
ضریب تغییرات (%)	۴/۵۸	۳/۸۴	۶/۰۲	۸/۰۵	۱۰/۴۹	۴/۳۶	۵/۱۲	۴/۶۶

BD, AWC, OC, NCP و Ks به ترتیب بیانگر جرم مخصوص ظاهری، گنجایش آب قابل جذب گیاه، کربن آلی، تخلخل غیرموییگی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشند.

عملیات کاشت ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.) رقم سیمون با بذرکارهای پنوماتیک چهار ردیفی و عملیات تهیه بستر کشت ذرت با ادوات خاکورزی اولیه همچون گاوا آهن برگردن‌دار، دیسک و ماله انجام شدند. کودهای شیمیایی مورد نیاز با توجه به نتایج تجزیه خاک شامل اوره (۴۰۰ کیلوگرم بر هکتار)، سوپرفسفات تریپل (۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار) و سولفات پتاسیم (۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار) پیش از کاشت یا در طول فصل زراعی در سطح مزرعه استفاده شد. کاشت بذر ذرت به میزان ۲۵ کیلوگرم بر هکتار در عمق پنج سانتی‌متری خاک انجام شد. آبیاری مزرعه با استفاده از سامانه آبیاری بارانی انجام شد. در پایان فصل رشد گیاه، برداشت محصول در قالب عملکرد بیولوژیک در هر نقطه مورد مطالعه در کرت‌هایی با مساحت چهار متر مربع انجام و بر حسب کیلوگرم بر هکتار محاسبه شد.

در بررسی تغییرپذیری ویژگی‌های خاک از روش کریجینگ^۳ استفاده شد. انتخاب روش مناسب میان‌یابی^۴ بر مبنای ریشه میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) و ضریب تبیین^۶ (R²) انجام شد. سپس، نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی‌ها و شاخص رتبه‌بندی فیزیکی خاک^۷ (PRI) با تکنیک‌های زمین‌آمار و استفاده از نرم افزار ArcGIS-9.2 انجام شد. انتخاب حداقل شاخص‌های لازم برای محاسبه شاخص رتبه‌بندی فیزیکی خاک (PRI) بر اساس نظریه اولیه گوپتا (Gupta, 1986) انجام شد. با توجه به این اصل کلی که اصلاح شرایط فیزیکی خاک موجب افزایش تولید محصول می‌شود، رتبه‌بندی شاخص‌های فیزیکی خاک بر مبنای تحقیقات در مورد رابطه بین داده‌های عملکرد محصول و ویژگی‌های فیزیکی خاک انجام شد. در این راستا، به هر ویژگی با بهترین کیفیت ارزش یک و با کمترین کیفیت ارزش ۰/۱ داده شد. از آنجا که در منطقه مورد مطالعه، شیب زمین کمتر از یک درصد و عمق آب زیرزمینی زیاد بود. لذا، اثر این دو شاخص را نادیده گرفته و در تعیین شاخص رتبه‌بندی فیزیکی (PRI) برای محصول ذرت، پنج ویژگی جرم مخصوص ظاهری

^۱-Noncapillary porosity

^۲-Available water capacity

^۳-Kriging

^۴-Interpolation

^۵-Root mean square error

^۶-Coefficient of determination

^۷-Physical rating index

(BD)، تخلخل غیرموییگی (NCP)، هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks)، گنجایش آب قابل جذب گیاه (AWC) و مقدار کربن آلی (OC) خاک در نظر گرفته شدند. رتبه بندی شاخص های فیزیکی خاک برای کشت ذرت در جدول ۲ ارائه شده است. در هر نقطه نمونه برداری (مشاهداتی)، با توجه به مقدار واقعی (اندازه گیری شده) هر ویژگی، ارزش آن مطابق جدول ۲ تعیین گردید. از آنجا که بر مبنای قانون حداقل لیبیگ^۱، انحراف مقدار هر شاخص از محدوده مناسب، می تواند رشد و عملکرد محصول را پایین آورد، لذا برای تعیین شاخص PRI، ارزش پنج شاخص در هم ضرب گردید.

$$\text{Physical rating index (PRI)} = W_{BD} \times W_{NCP} \times W_{KS} \times W_{AWC} \times W_{OC}$$

که در این رابطه، W_{BD} ، W_{NCP} ، W_{KS} ، W_{AWC} و W_{OC} به ترتیب بیانگر ارزش شاخص های جرم مخصوص ظاهری، تخلخل غیرموییگی، هدایت هیدرولیکی اشباع، گنجایش آب قابل جذب گیاه و مقدار کربن آلی خاک می باشند.

جدول ۲- ارزش گذاری ویژگی های فیزیکی خاک برای محصول ذرت.

OC (%)		AWC (cm/m)		Ks (cm/h)		NCP (%)		BD (g/cm ³)	
ارزش	دامنه	ارزش	دامنه	ارزش	دامنه	ارزش	دامنه	ارزش	دامنه
۱	۱/۳۵-۱/۴۵	۰/۹	>۱۵	۱	>۱	۰/۹۵	>۱۵	۱	>۱/۲
۰/۹۵	۱/۴۵-۱/۵	۱	۱۲/۵-۱۵	۰/۹۵	۱-۰/۵	۱۲/۵-۱۵	۱۲/۵-۱۵	۰/۹۵	۰/۹-۱/۲
۰/۹	۱/۵-۱/۵۵	۰/۹	۱۰-۱۲/۵	۰/۹	۰/۵-۰/۲	۱۰-۱۲/۵	۱۰-۱۲/۵	۰/۹	۰/۶-۰/۹
۰/۸۵	۱/۵۵-۱/۶	۰/۸	۷/۵-۱۰	۰/۸۵	۰/۲-۰/۱	۷/۵-۱۰	۷/۵-۱۰	۰/۸۵	۰/۴۵-۰/۶
۰/۸	۱/۶-۱/۶۵	۰/۷	۵-۷/۵	۰/۸	۰/۱-۰/۰۵	۵-۷/۵	۵-۷/۵	۰/۸	۰/۳-۰/۴۵
۰/۷۵	۱/۶۵-۱/۷	۰/۶۵	<۵	۰/۷۵	۰/۰۵-۰/۰۱	<۵	<۵	۰/۷۵	۰/۲-۰/۳
۰/۷	۱/۷-۱/۷۵	۰/۷		۰/۷	<۰/۰۱				
۰/۶۵	۱/۷۵-۱/۸								

تحلیل آماری داده ها

برای انجام تجزیه های آماری داده ها از نرم افزار SPSS-18 استفاده گردید. از آزمون کولموگروف اسمیرنوف برای تعیین نرمال بودن توزیع داده ها استفاده شد. برای نرمال سازی توزیع داده های غیرنرمال از تبدیل های ریشه دوم و لگاریتم استفاده شد.

نتایج و بحث

ارزیابی تغییرات مکانی ویژگی های خاک

اولین قدم در تحلیل های زمین آماری، بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده ها با تحلیل واریوگرام است. البته در صورت غیرنرمال بودن توزیع داده ها (چولگی و کشیدگی زیاد)، به ساختار واریوگرام و نتایج کریجینگ آسیب وارد می شود (Gulser et al., 2016). در این راستا، در مطالعه حاضر برای نرمال سازی داده ها از تبدیل گره های ریشه دوم و لگاریتم استفاده شد و سپس با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف، نرمال بودن داده ها تأیید گردید. بعد از محاسبه و ترسیم تغییرنماهای تجربی برای هر یک از ویژگی های خاک، با استفاده از شاخص های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (r^2) صحت الگوی مدل برازش داده شده، بررسی و مناسب ترین مدل نیم تغییرنما با

^۱-Liebig's Law of the Minimum

کمترین خطای برآورد و بیشترین ضریب تبیین انتخاب گردید. بر این اساس، برای ترسیم تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع، تخلخل غیرمویی و کربن آلی از مدل نمایی، برای جرم مخصوص ظاهری، مقادیر شن، سیلت، رس و عملکرد بیولوژیکی از مدل کروی و برای گنجایش آب قابل جذب گیاه از مدل Hole effect استفاده شد (جدول ۳). Gulser *et al.* (2016) نیز در مطالعات خود نشان دادند که ویژگی‌های شن و رس با مدل کروی و کربن آلی خاک با مدل نمایی بهتر برازش یافتند.

جدول ۳- نتایج تحلیل نیم‌تغییرنمای ویژگی‌های فیزیکی خاک.

متغیر	Sand	Silt	Clay (%)	NCP	OC	AWC (cm/m)	BD (g/cm ³)	Ks (cm/h)
مدل	کروی	کروی	کروی	نمایی	نمایی	Hole effect	کروی	نمایی
اثر قطعه‌ای (C ₀)	۰/۰۰۱	۰/۲۲	۰/۶۵	۰/۳۲	۰/۰۰۹	۰/۰۹۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
حد آستانه (C+C ₀)	۸/۲۷	۱/۰۹	۰/۹۴۷	۱/۱۲	۱/۰۵۹	۱/۱۲	۰/۰۱۳	۱/۰۴۲
دامنه تأثیر (R)	۲۶۴/۸۷	۱۹۲/۳۷	۳۲۷/۶۶	۲۰۴/۵۱	۱۸۴/۷۷	۱۴۵/۱	۱۶۱/۶۱	۱۳۷/۴۳
C ₀ /(C+C ₀)	۰/۰۰۰۱۲۱	۰/۲۰۱۸	۰/۶۸۶۳	۰/۲۸۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۸۴۸	۰/۲۳۰۷	۰/۰۰۱۹
r ²	۰/۷۸	۰/۶۴	۰/۸۲	۰/۵۶	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۹۱	۰/۶۵
RMSE	۱/۹۳	۲/۳	۲/۰۳	۳/۰۴	۰/۱۳	۲/۵۴	۰/۱۲	۰/۰۱۶

در مطالعه حاضر دامنه تأثیر جرم مخصوص ظاهری، ۱۶۱/۶۱ متر و هدایت هیدرولیکی اشباع، ۱۳۷/۴۳ متر بود (جدول ۳). با توجه به این‌که دامنه‌های تأثیر به‌دست آمده بیشتر از فاصله نمونه‌برداری بود، این موضوع نشان می‌دهد که فواصل نمونه‌برداری در نظر گرفته شده به‌خوبی توانسته است تغییرات مکانی این ویژگی‌ها را در خاک‌های منطقه نشان دهد. Iqbal *et al.* (2005) نیز دامنه تأثیر جرم مخصوص ظاهری را ۵۰۰ متر و Amirinejad *et al.* (2010) دامنه تأثیر این متغیر را ۲۷۵/۵ متر گزارش نمودند. علت اختلاف در دامنه تأثیر، تفاوت در مقیاس مطالعه و فاصله نمونه‌برداری است. به‌عبارت دیگر، بعضی از ویژگی‌های خاک نظیر سرعت نفوذ، هدایت هیدرولیکی و جرم مخصوص ظاهری دارای تغییرات مکانی وابسته به مقیاس نمونه‌برداری بودند (Saglam *et al.*, 2011).

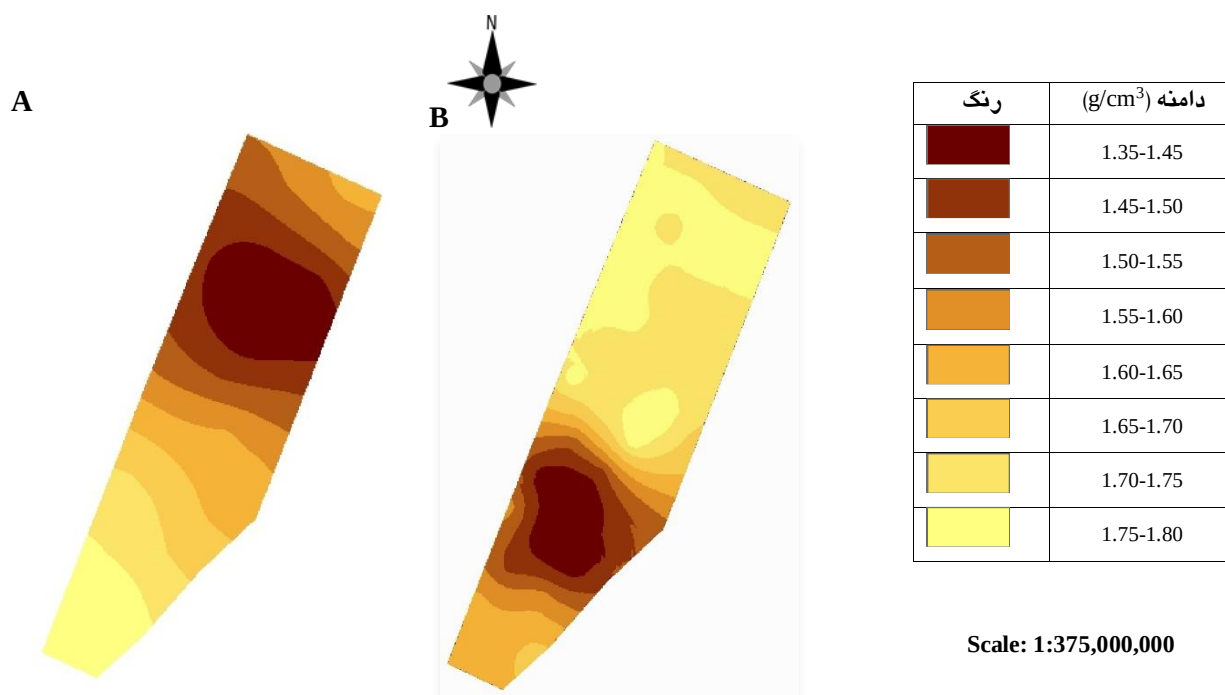
مقدار اثر قطعه‌ای برای جرم مخصوص ظاهری ۰/۰۰۳ و برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ۰/۰۰۲ بود. مقدار اثر قطعه‌ای در شرایط ایده‌آل صفر است یعنی، هر چه این مقدار نزدیک به صفر باشد، بیانگر تغییرات تصادفی کمتر در روند تغییرات ویژگی مورد نظر است (Castellini *et al.*, 2019). به‌عبارت دیگر، بالا رفتن مقدار اثر قطعه‌ای به‌دلیل تغییرات مشخصه مورد بررسی در فواصل کمتر از فاصله نمونه‌برداری، خطای آزمایش و یا تغییرات تصادفی و غیرقابل کنترل ایجاد می‌شود. Amirinejad *et al.* (2010) اثر قطعه‌ای برای ویژگی جرم مخصوص ظاهری را ۰/۰۰۲ گزارش نمودند که به نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر نزدیک است. مقدار اثر قطعه‌ای برای تخلخل خاک متوسط (۰/۳۹) بود که مؤید متوسط بودن تغییرات تصادفی در بررسی پراکنش مکانی تخلخل است.

در بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک، نسبت واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل (حد آستانه) (C₀/(C+C₀)) نشان‌دهنده استحکام ساختار مکانی است. مقدار بیش از ۰/۷۵ بیانگر ساختار قوی، ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ ساختار متوسط و کمتر از ۰/۲۵ ساختار مکانی ضعیف را نشان می‌دهد (Cambardella *et al.*, 1994). بر طبق نتایج، ساختار مکانی تخلخل غیرمویی و رس متوسط (به‌ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۲۸) و بقیه ضعیف به‌دست آمد. همین‌طور، اگر متغیری

دارای تغییرات مکانی متفاوت باشد، ناهمسانگرد^۱ و اگر تغییرات آن مستقل از جهت جغرافیایی باشد همسانگرد شناخته می‌شود (Reyes *et al.*, 2019). با توجه به اینکه نیم‌تغییرنماهای ترسیم شده پیوستگی مکانی یکسانی داشته و در همه جهات مشابه بودند، لذا، همه متغیرها همسانگرد بوده و به عبارتی، تحت تأثیر عوامل خارجی قرار نداشته‌اند.

ارزیابی ویژگی‌های خاک برای کاشت ذرت

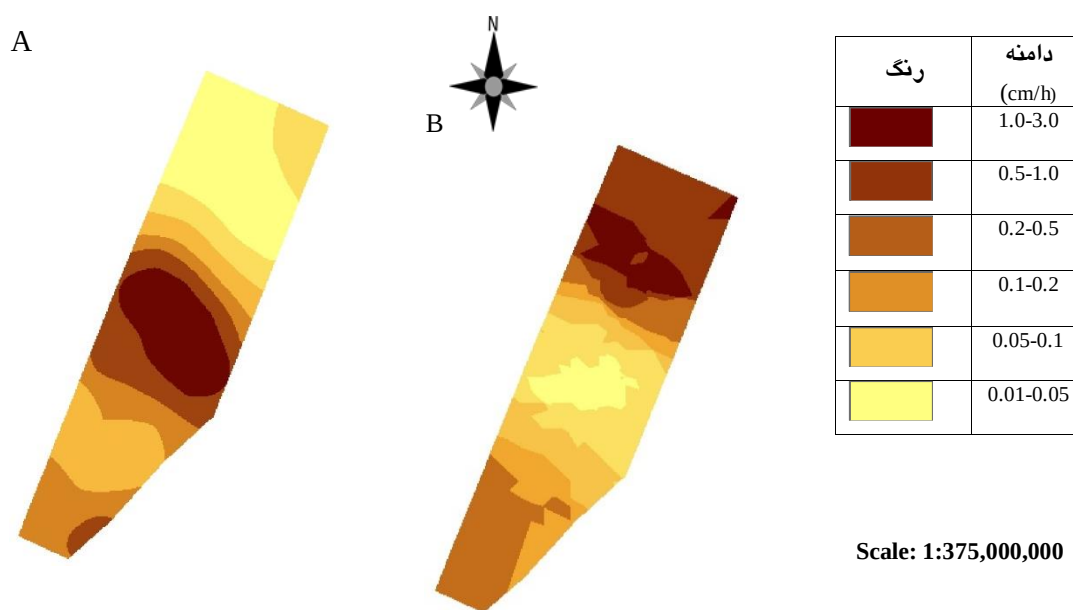
پس از انتخاب مدل مناسب و یافتن شاخص‌های بهینه میان‌یابی، نقشه پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. با توجه به توزیع نرمال داده‌ها، پس از معرفی مدل مناسب، نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های خاک برای هر دو لایه سطحی و زیرسطحی به روش کریجینگ معمولی ترسیم شد. نقشه پهنه‌بندی جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از مدل نیم‌تغییرنما کروی و به وسیله یک‌سری طیف رنگی تهیه گردید (شکل ۲). طبق توافق مرسوم، ارزش یک برای هر ویژگی به محدوده‌ای که رشد گیاه بهینه باشد تعلق گرفته و با انحراف از این محدوده بهینه، مقدار امتیاز به تدریج کاهش یافت. از آنجا که بافت خاک منطقه لومی رسی تا شنی لومی بود، لذا محدوده مناسب جرم مخصوص ظاهری برای کشت ذرت ۱/۳-۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و با ارزش یک و برای محدوده ۱/۴۵-۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ارزش ۰/۹۵ و برای محدوده ۱/۷۵-۱/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ارزش ۰/۶۵ تعیین گردید (Gupta, 1986). به عبارت دیگر، به تناسب افزایش جرم مخصوص ظاهری، ارزش یا رتبه مربوطه مطابق جدول ۱ کاهش یافت. مطابق شکل ۲، حدود ۶۰ درصد لایه زیرسطحی خاک منطقه متراکم بوده و دارای جرم مخصوص ظاهری بیش از ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. به عبارتی، تراکم لایه‌های زیرسطحی یک محدودیت شدید برای رشد و توسعه ریشه در خاک و تولید موفق محصول ذرت در منطقه مورد مطالعه است.



شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر (A) و ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر (B) در منطقه مورد مطالعه.

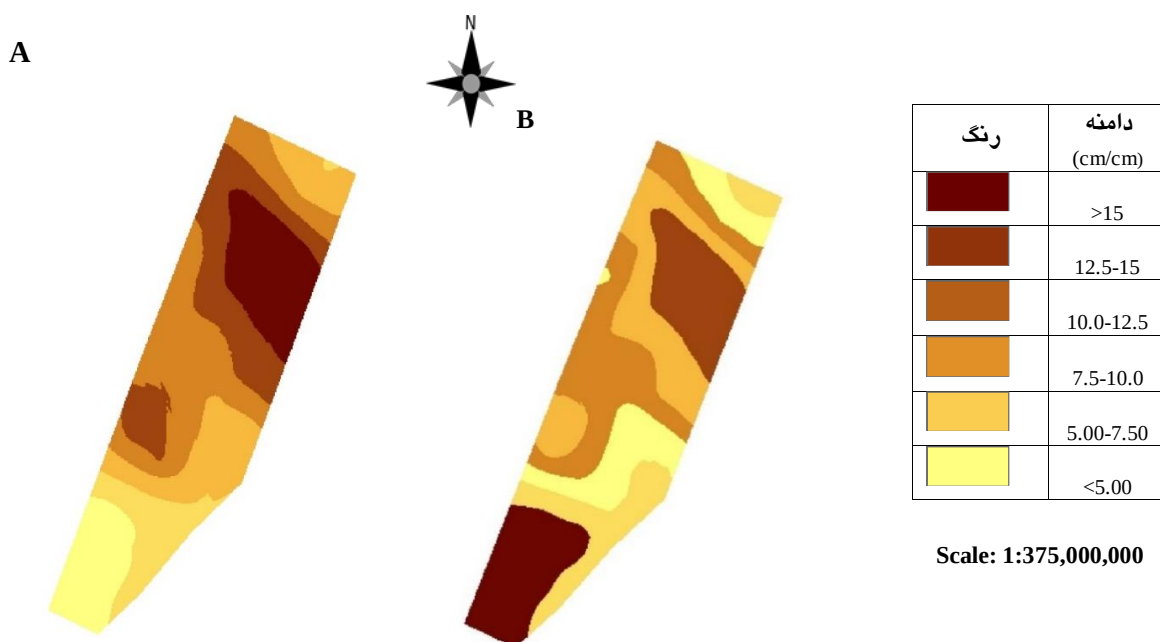
¹-Anisotropic

مطابق توضیحات بالا، نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع برای هر دو لایه سطحی و زیرسطحی با استفاده از مدل نمایی تهیه شد (شکل ۳). محدوده بهینه این شاخص برای کشت ذرت ۱-۳ سانتی‌متر بر ساعت و با ارزش یک تعیین شد (Gupta, 1986). مناطقی با هدایت هیدرولیکی کمتر از ۰/۱ سانتی‌متر بر ساعت دارای ارزش ۰/۸ بودند که تقریباً ۴۰ درصد لایه زیرسطحی را در شمال منطقه پوشش دادند.



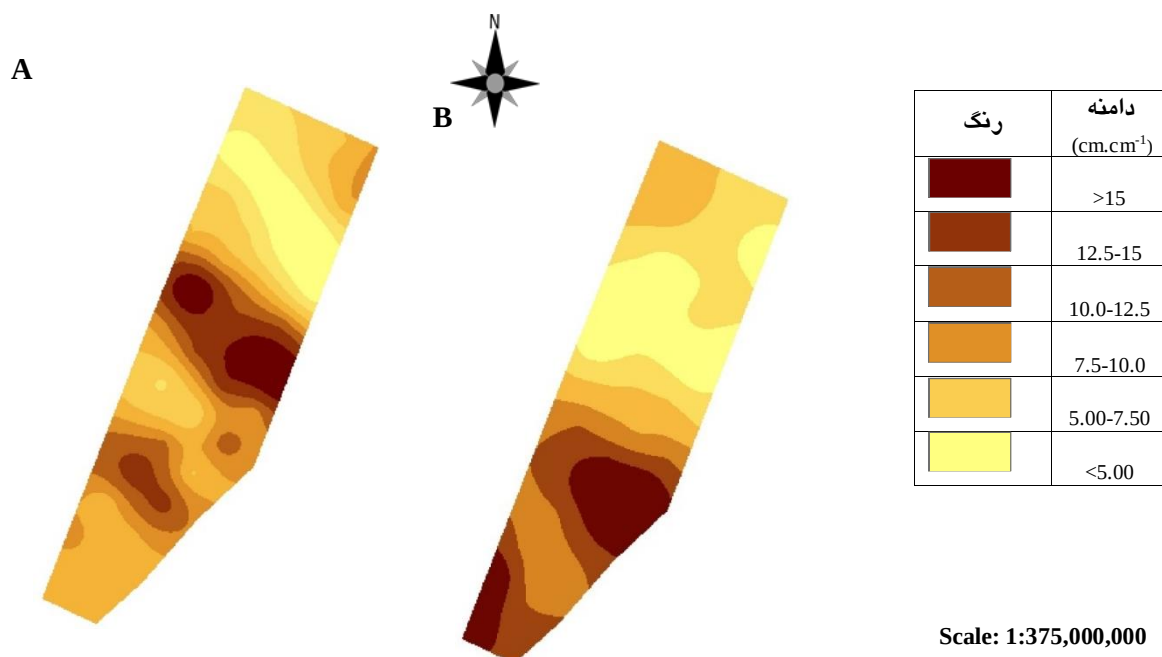
شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی خاک در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر (A) و ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر (B) در منطقه مورد مطالعه.

نقشه پهنه‌بندی گنجایش آب قابل جذب گیاه نیز با استفاده از مدل Hole effect ترسیم گردید (شکل ۴). تغییرات این شاخص در خاک‌های منطقه متناسب با مقادیر رس و جرم مخصوص ظاهری بین ۴ تا ۱۸ درصد بوده و با افزایش جرم مخصوص ظاهری و یا کاهش مقدار رس، مقدار این رطوبت کاهش یافت. به عبارت دیگر، تراکم و فشردگی لایه‌های زیرسطحی خاک باعث کاهش تخلخل و گنجایش رطوبت خاک شده که کاهش رشد و عملکرد محصولات زراعی و از جمله ذرت را به دنبال دارد. دامنه بین ۱۵-۱۲/۵ درصد به عنوان محدوده بهینه برای کاشت ذرت و مقادیر کمتر از ۵ درصد نیز دارای کمترین ارزش (۰/۶۵) بودند (Gupta, 1986). به عبارت دیگر، حدود ۱۰ درصد اراضی دارای کیفیت مناسب از نظر گنجایش آب قابل جذب گیاه بوده و تقریباً ۴۵ درصد منطقه دارای مشکل شدید تا خیلی شدید از نظر رطوبت خاک هستند. (Kavianpoor et al., 2012) مقدار این آماره را ۱/۵ و Zhang et al. (2013) مقدار آن را ۰/۰۷ گزارش کرده‌اند. به عبارت دیگر، به دلیل این اختلاف‌ها، نمی‌توان از مقادیر مطلق اثر قطعه‌ای برداشت درستی از تغییرات سیستماتیک و تصادفی متغیر داشت (Aruna et al., 2016).



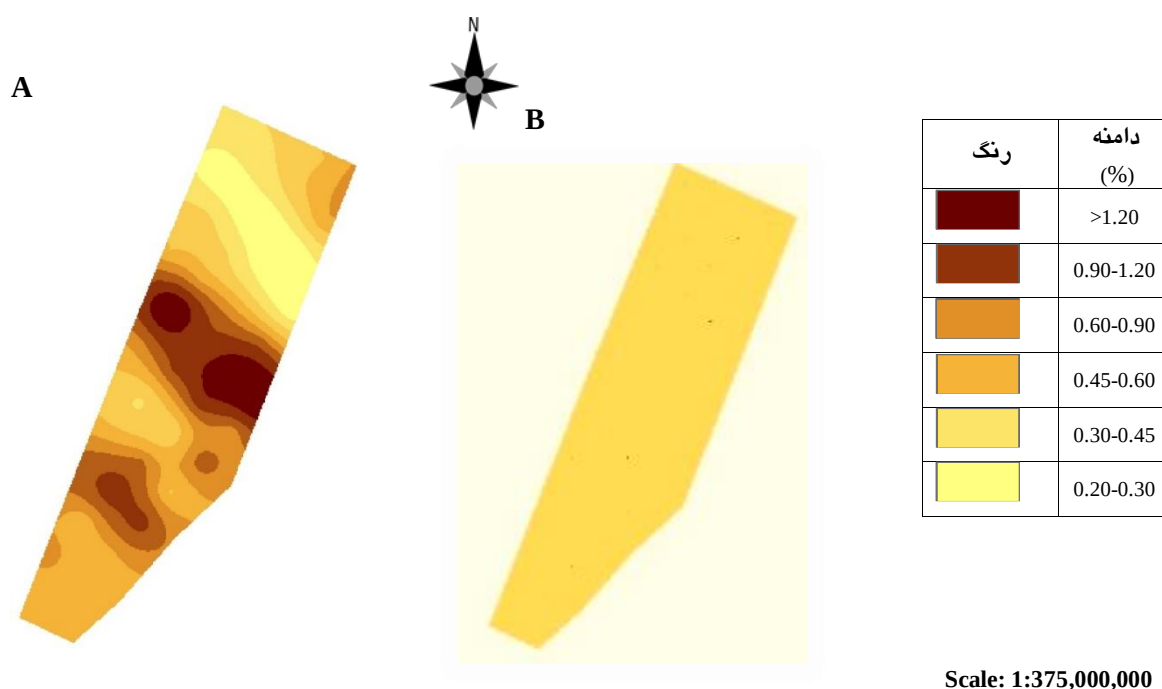
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی گنجایش آب قابل جذب گیاه در خاک در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر (A) و ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر (B) در منطقه مورد مطالعه.

نقشه پهنه‌بندی تخلخل غیرمویی (NCP) با روش کریجینگ معمولی و مدل نمایی ترسیم گردید (شکل ۵). تخلخل غیرمویی با دامنه ۱۵-۱۲/۵ درصد بیانگر شرایط ایده‌آل فیزیکی رشد گیاه ذرت بود و به آن رتبه یک تعلق گرفت (Gupta, 1986). به عبارتی، با افزایش یا کاهش این مقدار، کیفیت و شرایط فیزیکی خاک از نظر تخلخل غیرمویی کاهش می‌یابد. مطابق نتایج (شکل ۵)، بیش از ۵۰ درصد لایه زیرسطحی با محدودیت زیاد تا خیلی زیاد برای کشت و رویش ذرت بوده و به عبارتی، با افزایش جرم مخصوص ظاهری و تراکم لایه‌های زیرسطحی خاک (مناطق شمالی منطقه مورد مطالعه)، رشد گیاه ذرت کاهش معناداری داشته است.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی تخلخل غیرمویینگی خاک در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر (A) و ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر (B) در منطقه مورد مطالعه.

نقشه پهنه‌بندی کربن آلی خاک هر دو لایه در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل کروی تهیه و ترسیم گردید (شکل ۶). بر اساس جدول ۲، مقادیر بیش از ۱/۲ درصد کربن آلی به عنوان شرایط ایده‌آل و بهینه (ارزش یک) بوده و با کاهش از این حد، ارزش و کیفیت خاک برای رشد گیاه ذرت کاهش می‌یابد (Gupta, 1986). نقشه پهنه‌بندی کربن آلی لایه‌های سطحی و زیرسطحی خاک (شکل ۶) نشان می‌دهد که فقط حدود ۱۰ درصد لایه فوقانی در اراضی مورد مطالعه دارای شرایط بهینه از نظر کربن آلی بوده و در مقابل، تمام مساحت منطقه در لایه زیرسطحی دارای کربن آلی کمتر از ۰/۳ درصد هستند. طبعاً، شرایط خاک از نظر کمبود ماده آلی (به‌ویژه در لایه‌های زیرسطحی) می‌تواند موجب کاهش خاکدانه‌سازی و تخلخل خاک و محدودیت رشد و توسعه ریشه در خاک گردد.

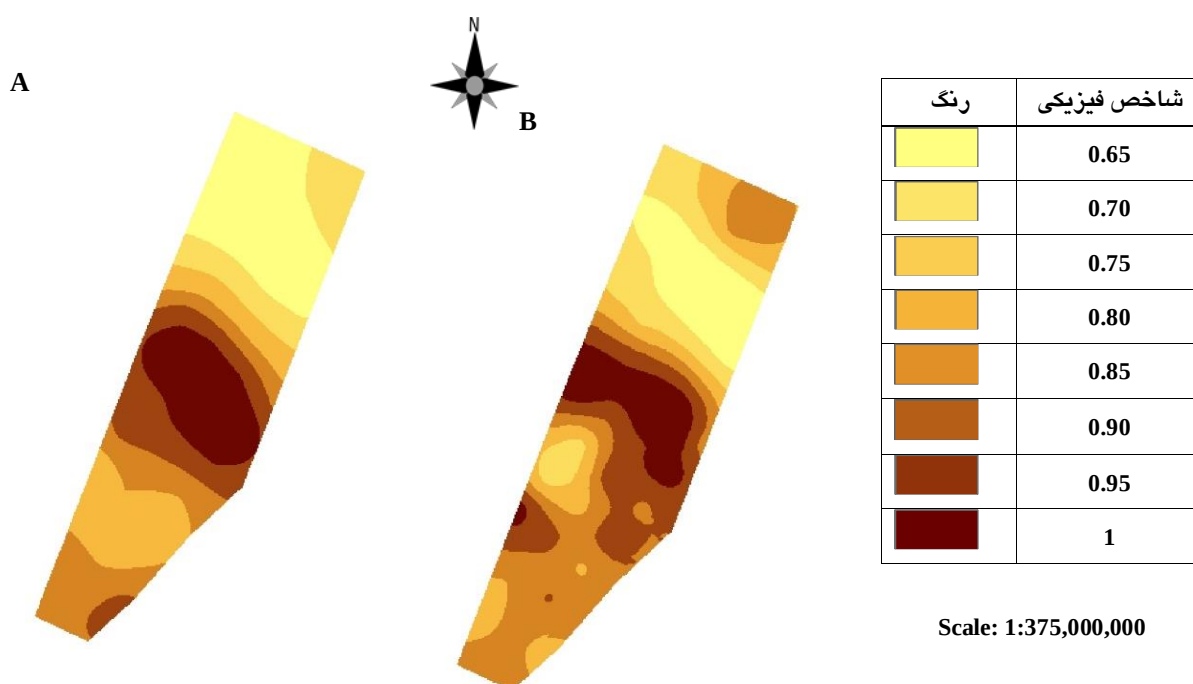


شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی کربن آلی خاک در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر (A) و ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر (B) در منطقه مورد مطالعه.

شاخص رتبه‌بندی فیزیکی خاک

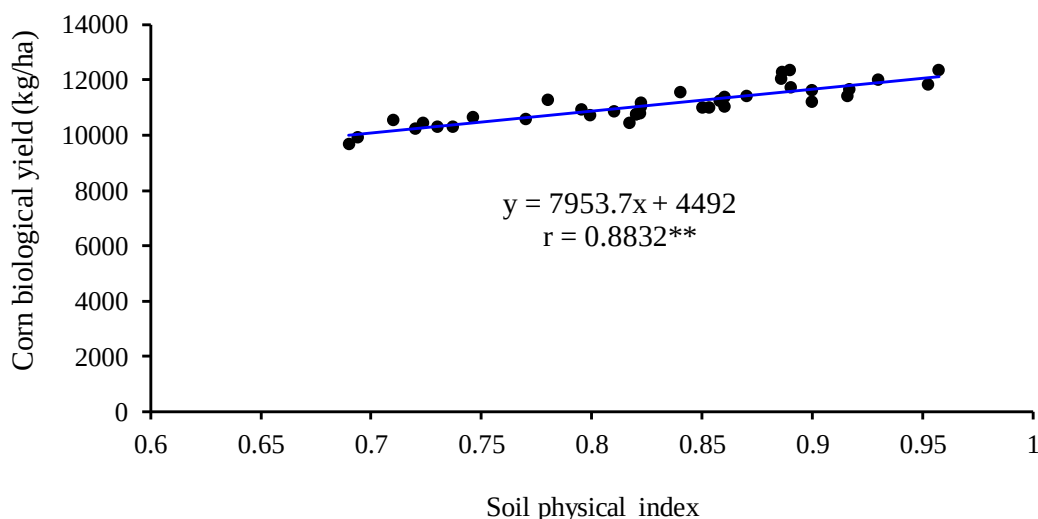
همانطور که پیش‌تر در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، شاخص رتبه‌بندی فیزیکی (PRI) با استفاده از حاصل-ضرب ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی اشباع، گنجایش آب قابل جذب گیاه، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی و تخلخل غیرمویی‌نگی تعیین گردید. به عبارت دیگر، در هر نقطه نمونه‌برداری، با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده، ارزش هر ویژگی تعیین و بعد با حاصل‌ضرب آن‌ها، شاخص PRI محاسبه شد. در آخر، با روش کریجینگ معمولی و استفاده از مدل نیم‌تغییرنمای کروی، نقشه رتبه‌بندی فیزیکی خاک هر دو لایه سطحی و زیرسطحی ترسیم گردید (شکل ۷).

بر مبنای نتایج حاصله، هر چند در بخش‌های جنوبی و مرکزی اراضی مورد بررسی، شرایط برای رشد ذرت خوب است، اما در نواحی شمالی که حدود ۳۵ اراضی را شامل می‌شود، کیفیت فیزیکی (به ویژه در لایه‌های زیرسطحی) مناسب نیست. به عبارت دیگر، به علت افزایش تراکم و جرم مخصوص ظاهری خاک و به نسبت آن، کاهش تخلخل غیرمویی‌نگی و ذخیره رطوبت قابل دسترس، ضمن کاهش میزان ماده آلی، شاخص فیزیکی خاک به کمتر از ۰/۷ رسیده است. این مطالب بیانگر توان تولیدی پایین محصول ذرت در این مناطق مزرعه است. بنابراین، در راستای کشاورزی پایدار و افزایش قابلیت تولید خاک برای کاشت این محصول، می‌بایست به اصول مدیریت خاک بیشتر توجه کرد. مهمترین اقدامات در این زمینه می‌تواند حذف کفه شخم (سخت‌لایه شخم) در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر با زیرشکن و به دنبال آن، استفاده از کودهای حیوانی و کمپوست یا برگرداندن بقایای گیاه به خاک، در جهت افزایش میزان ماده آلی، حفظ رطوبت، تسریع در عملیات خاکدانه‌سازی و بهبود تخلخل و نفوذپذیری خاک باشد.



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی شاخص فیزیکی خاک در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر (A) و ۲۵ تا ۵۰ سانتی‌متر (B) در منطقه مورد مطالعه.

همینطور، نتایج بیانگر همبستگی خیلی خوب ($r = 0.8832^{**}$) شاخص فیزیکی خاک با عملکرد بیولوژیکی ذرت در منطقه مورد مطالعه بود (شکل ۸). مشابه این نتایج، Amirinejad *et al.* (2010) نیز با تعیین شاخص PRI با استفاده از صفات جرم مخصوص ظاهری، آب قابل دسترس، کربن آلی، تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، ضریب همبستگی بین شاخص فیزیکی خاک و عملکرد گندم و برنج را به ترتیب نسبتاً خوب و خوب گزارش کرده‌اند.



شکل ۸- رابطه بین شاخص فیزیکی خاک و عملکرد بیولوژیکی ذرت در منطقه مورد مطالعه.

نتیجه‌گیری کلی

با بررسی همبستگی بین شاخص رتبه‌بندی فیزیکی خاک و عملکرد محصولات زراعی، می‌توان اطلاعات مفیدی در زمینه شناسایی مناطق با کیفیت فیزیکی نامناسب در یک مزرعه زراعی به‌دست آورد. به‌عبارت دیگر، استفاده از روش‌های زمین‌آمار گامی مهم در راستای بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌ها و افزایش کیفیت فیزیکی خاک است. بنابراین، می‌توان گفت که شاخص رتبه‌بندی فیزیکی یک شاخص مهم برای بررسی کیفیت خاک است تا با توجه به آن و بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی‌های فیزیکی، در جهت بهبود شرایط فیزیکی خاک و افزایش محصول اقدام کرد. لذا، پیشنهاد می‌شود در راستای کشاورزی پایدار و افزایش قابلیت تولید برای کاشت محصول ذرت، با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی‌های فیزیکی خاک، در زمینه حذف کفه شخم (سخت‌لایه شخم) در لایه زیرسطحی با زیرشکن و به‌دنبال آن، استفاده از کودهای حیوانی و کمپوست یا برگرداندن بقایای گیاه به خاک اقدام نمود.

منابع مورد استفاده

References

- Aruna1, L., Vijayavalli, G., Vivinraj, R., Vineetha, K., & Vigneshwaran, P. (2016). Study on spatial variability of soils using GIS. *Journal of Engineering Research and Application*, 6 (12), 16-22. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i121488>
- Amirinejad, A.A., Kamble K., Aggarwal P., Chakraborty D., Pradhan S., & Mittal R.B. (2010). Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. *Geoderma*, 160, 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.021>
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco, R.F., & Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society America Journal*, 58, 1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Castellini, M., Maria Stellacci, A., Tomaiuolo, M., & Barca, E. (2019). Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in a durum wheat field: An assessment by the BEST-procedure. *Water*, 11(10), 2185. <https://doi.org/10.3390/w11071434>
- Gee, G.W. & Bauder J.W. (1986). Particle size analysis, In: *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 5.1, Second Edition, SSSA Book Series 9, Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Gulser, C., Ekberli, I., & Candemir, F. (2016). Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5(3), 192. <https://doi.org/10.18393/ejss.2016.3.192-200>
- Gupta, R P. (1986). Criteria for physical rating index for soils in relation to crop production. Pp. 69-71. In: *XIII International Soil Science Society Congress*, 4-6 November, 1986, Hemburg, Germany.
- Iqbal, J., Thomasson J.A. Jenkins J.N. Owens P.R. & Whisler F.D. (2005). Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1338-1350. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0154>
- Jacob, H., & Clarke Topp, G. (2002). *Methods of soil analysis*, Part 4: Physical Methods, First Edition, Soil Science Society of America Book Series, Madison, Wisconsin, USA. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4>
- Kavianpoor, H., Esmali Ouri A. Jafarian Z. & Kavian A. (2012). Spatial variability of some soil chemical and physical soil properties in Neosho mountainous rangelands. *American Journal of Environmental Engineering*, 2, 34-44. <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20120201.06>
- Mondani, F., Karami, P., & Ghobadi, R. (2021). Simulation of moisture regimes effect on maize (*Zea mays* L.) growth and yield in Kermanshah region by CERES-Maize model. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 3(1), 39-56. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/CSRAR.2021.280069.1091>
- Reyes, J., Wendroth, O., Matocha, C., & Zhu, J. (2019). Delineating site-specific management zones and evaluating soil water temporal dynamics in a farmer's field in Kentucky. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-19. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.07.0143>

- Richards, L.A., & Fireman, M. (1943). Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science*, 56(6), 395–406. <https://doi.org/10.1097/00010694-194312000-00001>
- Wilcox, L.V., 1951. A method for calculating the saturation percentage from the weight of a known volume of saturated soil paste. *Soil Science*, 72, 233–238
- Saglam, M., Öztürk H.S. Ersahin S. & 'Iözkan A. (2011). Spatial variation of soil physical properties in adjacent alluvial and colluvial soils under Ustic moisture regime. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8, 4261-4280. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-4261-2011>
- Walkley, A. & Black I.A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Wilcox, L.V. (1951). A method for calculating the saturation percentage from the weight of a known volume of saturated soil paste. *Soil Science*, 72, 233–238.
- Zhang, S.W., Shen C.Y. Chen X.Y. Ye H.C. Huang Y.F. & Lai S. (2013). Spatial interpolation of soil properties using compositional kriging and regression kriging with consideration of the characteristics of compositional data and environment variables. *Journal of Integrative Agriculture*, 1, 1673-1683. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60395-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60395-0)
- Zulfikar Khan, M., Rafikul Islam, M., Bin Abdus Salam, A., Ray, T. (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*, (7),1-19. <https://doi.org/10.1155/2021/6639180>