



Delineation of soil fertility management zones in paddy fields using geostatistical and fuzzy clustering methods

Seyed Mostafa Emadi¹ 

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mostafa.emadi@sanru.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 30, 2025

Revised: June. 21, 2025

Accepted: June. 28, 2025

Published online: Sep. 2025

Keywords:

*Site-specific management,
Rice,
Soil organic carbon Chemical
fertilizer,
Soil properties zoning.*

ABSTRACT

Currently, the application of chemical fertilizer is carried out without taking into account the spatial variability of soil nutrients in paddy fields, which creates a lot of environmental problems. In this study, the integration of the geostatistics methods, principal components analysis and the fuzzy clustering were used to support the management area of 54 hectares of the Masandaran province's paddy fields. 85 compound soil samples were removed and the important physical and chemical properties of the soil were measured. The selection of the best Interpolation method for regionalization the properties of the soil was made using the most accurate and consistent statistics. Principal components analysis revealed four components with eigenvalues greater than one. The first component, explaining 38.78% of the variance, had the highest contribution. The second (17.82%), third (14.19%), and fourth (8.69%) components followed in descending order. Collectively, these four components accounted for 79.49% of the total data variability. Using fuzzy c-menas type clustering analysis, management areas were selected by considering two indexes of fuzzy performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE). The FPI and NCE were the lowest in the number of three areas, with values of 0/0683 and 0/0333, and thus the optimum number of areas, three areas were determined so that 18/34 hectares of land were placed in area 1, 26/15 hectares in area 2 and 13/12 hectare in area 3. This approach enables precise identification of management zones, facilitating targeted fertilizer management, which can reduce chemical input usage and environmental pollution.

Cite this article: Emadi, S.M. (2025). Delineation of soil fertility management zones in paddy fields using geostatistical and fuzzy clustering methods, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (7), 1761-1779.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394424.669932>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394424.669932>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Optimum application of chemical fertilizers in low-lying alluvial soils of Mazandaran province with high water tables is of great importance in view of its environmental concerns. The site-specific management of soils can be applied when the accurate information of spatial variability of soil properties is identified. Currently, fertilizer management recommendations for rice in paddy fields of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) are being uniformly applied without consideration of spatial heterogeneity of nutrient content in soils. This study tries to integrate the geostatistics, principal component (PCA) and fuzzy c-means clustering methods for possible delineation of soil management zones (SMZs) in paddy fields.

Methodolog:

In this study, paddy fields of 54 ha were selected as the study site in SANRU and 85 soil composite samples were taken from the topsoil (0–30 cm), on an 80-m grid. Soil samples were analyzed for pH, EC, texture, organic carbon, total nitrogen (N), N-nitrate, available nutrients (P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu) and cation-exchange capacity. The raw data passed the Kolmogorov-Smirnov normality test and their spatial variability was analyzed and spatial distribution maps were constructed using interpolation techniques. The PCA and fuzzy c-means clustering algorithm were then performed to delineate MZs, and eigenvalues were used to select the principal components (PCs) for cluster analysis. Fuzzy performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE) were used to determine the optimum cluster number.

Results and discussion

Mean contents of organic carbon and total nitrogen were 2.03 and 0.193 %, respectively, and had the 21.31 and 26.40 % of coefficient of variation. The coefficient of variation of N-nitrate (41%) was more than total nitrogen due to its inherent mobile characteristics. The best fitted semivariogram models for pH, EC, N-nitrate, CEC, clay, P and Mn was exponential but for OC, total N and Fe the spherical model was best fitted. The semivariogram models for Zn and Cu was Gaussian due to the high correlation and minimum RSS. The selection of best interpolation method within kriging, inverse distance within and conditional simulations techniques was conducted by consideration of mean absolute error, root mean square error, and concordance correlation coefficient. The results of PCA indicated that PCs 1, 2, 3 and 4 were considered significant (eigenvalues greater than 1.0); these together accounted for 79.49 % of total variance. The optimum number of MZs for the study area was three and analysis of variance indicated that the MZs were reasonable for the area. The MZs differed significantly with respect to studied soil properties. EC, N-nitrate, P, K and Zn were significantly higher in MZ 3 in comparison with MZs of 1 and 2. OC and total N content in MZs of 2 and 3 were significantly higher than those in MZ 1. Overall, the different management of paddy fields in the study area for three delineated zones can potentially increase the productivity of rice production and in turn, can decrease economically the fertilizers (N, P, K) application. The better nutrient contents of MZ 3 also reflected in more harvested yields compared with MZ 1 and 2.

Conclusions

Thus, the study emphasized that the methodology for delineating MZs could be helpful for site-specific soil nutrient management within the fields in low-lying flat landscape with apparent uniform soil characteristics in Mazandaran province and even in Iran. Therefore, based on the study, the following suggestions seem important in conducting future research:

- For the regionalization of soil properties, proximal soil sensor should be used so that there is both cost and the possibility of identifying annual changes.
- Use the integration of geostatistical methods with other fuzzy clustering algorithms such as k-means and ect.
- Other characteristics of the land, such as the state of drainage, slope, etc., should also be used in the separation of management areas.

Author Contributions

Writing—original draft preparation, methodology, software, Conceptualization, funding acquisition, resources, S.M.E.

Data Availability Statement

All data and results are presented in the text of the article.

Acknowledgements

This article is derived from a research project (Code: 04-1394-01), approved by the Research and Technology Council of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. I sincerely thank the university's Vice Chancellor for Research and all individuals who contributed to this study.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

تعیین نواحی مدیریتی حاصلخیزی خاک‌های شالیزار با استفاده از روش‌های زمین آماری و خوشه‌بندی فازی

سید مصطفی عمادی^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

mostafa.emadi@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در حال حاضر کاربرد کودهای شیمیایی بدون در نظر گرفتن تغییرات مکانی عناصر غذایی خاک در شالیزارها انجام می‌شود که مشکلات زیست‌محیطی زیادی را ایجاد می‌کند. در این تحقیق، از ادغام روش‌های زمین آماری، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و خوشه بندی فازی برای مرزبندی نواحی مدیریتی ۵۴ هکتار از اراضی شالیزاری استان مازندران استفاده شد. ۸۵ نمونه خاک مرکب برداشته شد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مهم خاک اندازه‌گیری شدند. انتخاب بهترین روش درون‌یابی برای پهنه‌بندی خصوصیات خاک، با استفاده از آماره‌هایی با بیش‌ترین دقت و همبستگی انجام شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که چهار مؤلفه با مقدار ویژه بالاتر از یک شناسایی شدند. مؤلفه اول با توجیه ۳۸/۷۸ درصد از تغییرات، بیشترین سهم را داشت. مؤلفه‌های دوم (۱۷/۸۲٪)، سوم (۱۴/۱۹٪) و چهارم (۸/۶۹٪) به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در مجموع، این چهار مؤلفه قادر به تبیین ۷۹/۴۹٪ از کل تغییرپذیری داده‌ها بودند. با استفاده از تحلیل خوشه‌بندی از نوع c-menas فازی، نواحی مدیریتی با در نظر گرفتن دو آماره‌ی شاخص کارآمدی فازی شدن (FPI) (و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده (NCE) (انتخاب شدند. FPI و NCE در تعداد سه ناحیه، به ترتیب با مقادیر ۰/۰۶۸۳ و ۰/۰۳۳۳ کم‌ترین مقدار بوده و به همین علت تعداد بهینه ناحیه‌ها، سه ناحیه تعیین شد به طوری که ۱۸/۳۴ هکتار از اراضی در ناحیه ۱، ۲۶/۱۵ هکتار در ناحیه ۲ و ۱۳/۱۲ هکتار در ناحیه ۳ قرار گرفتند. این رویکرد با شناسایی دقیق نواحی، امکان اعمال مدیریت کودی هدفمند را فراهم کرده و می‌تواند به کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و آلاینده‌گی محیطی منجر شود.
واژه‌های کلیدی: مدیریت ویژه مکانی، برنج، کربن آلی خاک، کود شیمیایی، پهنه‌بندی خصوصیات خاک.	

استناد: عمادی، سید مصطفی. (۱۴۰۴). تعیین نواحی مدیریتی حاصلخیزی خاک‌های شالیزار با استفاده از روش‌های زمین آماری و خوشه‌بندی فازی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۷)، ۱۷۷۹-۱۷۶۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394424.669932>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394424.669932>

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین امنیت غذایی جهانی، همواره با چالش‌های متعددی در زمینه بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و افزایش بهره‌وری مواجه بوده است (Islam, 2025). در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، فشار مضاعفی بر سیستم‌های کشاورزی وارد کرده و لزوم استفاده از روش‌های مدیریتی کارآمدتر را بیش از پیش آشکار ساخته است (Ma et al., 2024). یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه، مدیریت ناکارآمد کود و نهاده‌های کشاورزی است که نه تنها منجر به کاهش بازده محصول می‌شود، بلکه آلودگی محیط‌زیست و افزایش هزینه‌های تولید را نیز در پی دارد (Brunelle et al., 2024).

در روش‌های سنتی مدیریت مزرعه، کوددهی و سایر عملیات زراعی معمولاً به‌صورت یکنواخت و بدون توجه به تغییرات مکانی خاک و نیازهای واقعی گیاه انجام می‌شود (Khan et al., 2023). این رویکرد نه تنها کارایی استفاده از منابع را کاهش می‌دهد، بلکه ممکن است به تخریب کیفیت خاک و کاهش پتانسیل تولید در بلندمدت منجر شود (Raj et al., 2024). برای مثال، در بسیاری از مناطق، از جمله ایران، این شیوه مدیریتی همچنان رایج است و مطالعات نشان می‌دهد که عدم توجه به تغییرپذیری مکانی خاک، یکی از عوامل اصلی کاهش بهره‌وری در بخش کشاورزی محسوب می‌شود (خزائی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Ichami et al., 2020).

در این راستا، کشاورزی دقیق به‌ویژه مدیریت ویژه مکانی به‌عنوان راهکاری نوین مطرح شده است که می‌تواند با بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و تطبیق روش‌های خاکورزی با شرایط هر ناحیه، به بهبود عملکرد و پایداری سیستم‌های کشاورزی کمک کند (Getahun et al., 2024). با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در پیاده‌سازی این روش، تعیین دقیق ناحیه‌های مدیریتی درون مزارع است. این فرآیند به دلیل تأثیرپذیری عملکرد محصولات از عوامل متعدد و پیچیده، اغلب دشوار و در برخی موارد حتی غیرممکن تلقی می‌شود (Cammarano et al., 2018). برخی از این عوامل، مانند ویژگی‌های فیزیکی خاک، نسبتاً قابل کنترل هستند، در حالی که عوامل دیگر مانند تغییرات اقلیمی محلی یا تنوع ژنتیکی گیاهان با روش‌های معمول کشاورزی به‌سختی مدیریت می‌شوند (Filintas et al., 2020). علاوه بر این، تاکنون روشی استاندارد و جهان‌شمول برای تعیین مرز ناحیه‌های مدیریتی ارائه نشده است و این فرآیند همواره نیازمند انطباق با شرایط خاص هر منطقه است (Huguet et al., 2025).

پیشینه پژوهشی

تکنیک‌های کارآمد برای اندازه‌گیری و ثبت تغییرات خصوصیات خاک یک مزرعه، برای مدیریت یکنواخت نهاده‌ها، بسیار مهم و مسئله کلیدی محسوب می‌شود (Peralta and Costa, 2013). Ortega and Santibanez (2007) دریافته‌اند که استفاده از ناحیه‌های مدیریتی همگن، پتانسیل مناسبی برای مدیریت ویژه مکانی محصولات زراعی و به‌خصوص انگور داشته است. در مطالعه‌ای (Kyaw et al., 2008) دریافته‌اند که استفاده ویژه مکانی از کودهای آهن و ارقام مقاوم به زرد شدن رگبرگ‌ها (کلروز) می‌تواند از مدیریت یکنواخت مناسب‌تر باشد. محققان از روش‌های متفاوتی برای تعیین مرز ناحیه‌های مدیریتی در مزارع استفاده کرده‌اند. به همین ترتیب اطلاعات خاک مانند مقادیر عناصر غذایی (Ouazaa et al., 2022; Shukla et al., 2025)، رسانایی الکتریکی ظاهری^۲ (Serrano et al., 2022; Bottega et al., 2022) و رنگ خاک (Inman et al., 2010; Inman et al., 2008) برای تفکیک ناحیه‌های مدیریتی مورد استفاده قرار گرفته شده است. از توپوگرافی (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲) و تجربه زارع (Martínez-Casasnovas et al., 2018) نیز در برخی موارد به‌عنوان فاکتور اساسی برای تعیین مرز ناحیه‌های مدیریتی استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های خاک (مانند عناصر غذایی، هدایت الکتریکی و رنگ خاک) از دقت بالایی برخوردارند زیرا مستقیماً با رشد گیاه مرتبط هستند، اما نمونه‌برداری و آزمایش خاک ممکن است پرهزینه و زمان‌بر باشد (Barman et al., 2021). روش‌های توپوگرافی (مانند شیب و ارتفاع) به دلیل سهولت جمع‌آوری داده‌ها از طریق سنجش از دور یا GPS مقرون‌به‌صرفه هستند، اما در مناطق با توپوگرافی یکنواخت یا بدون ارتباط مستقیم با عملکرد محصول، کارایی کمتری دارند (Agyeman et al., 2022). از سوی دیگر، استفاده از تجربه زارع روشی کم‌هزینه و مبتنی بر دانش بومی است که برای مزارع کوچک مناسب می‌باشد، اما به دلیل ذهنی بودن و عدم پشتوانه علمی دقیق، ممکن است قابلیت تعمیم‌پذیری محدودی داشته باشد (Schenatto et al., 2017).

1 -Chlorosis-tolerant cultivar

2 -Apparent electrical conductivity

در میان این چنین روش‌هایی، الگوریتم‌های خوشه‌بندی از ابزارهای کارآمد برای مرزبندی ناحیه‌های مدیریتی مزارع هستند زیرا این روش‌ها به لحاظ ریاضی نقاط و یا سلول‌های با خصوصیات مشابه را در درون یک ناحیه یکسان قرار دهند تا با جداسازی و مرزبندی خاک‌های یک مزرعه، به مدیریت یکنواخت نهاده بپردازند (Moharana et al., 2019; Breunig et al., 2020; Liu et al., 2021). در پژوهشی Fu et al. (2010) از خوشه‌بندی فازی حاصل از ۶ خصوصیت عناصر غذایی خاک برای تعیین مرز ناحیه‌های مدیریتی استفاده کردند. همچنین Davatgar et al. (2012) نیز با در نظر گرفتن برخی خصوصیات شیمیایی خاک به جداکردن ناحیه‌های مدیریتی مختلف اراضی شالیزار استان گیلان پرداختند. این محققین برای جدا کردن ناحیه‌های مختلف مدیریتی از تجزیه مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی استفاده کردند که از نوع فرآیندهای طبقه‌بندی نظارت نشده بود اما در سطح بسیار وسیع که با توجه به خرده مالک بودن اراضی شالیزاری، امکان مدیریت کلان بر این اراضی را تقریباً سخت و غیر ممکن می‌کند. به‌تازگی از ادغام روش زمین‌آماري و آنالیز چند متغیره برای جداسازی ناحیه‌های مدیریتی استفاده شده و همبستگی بالایی بین تغییرپذیری خصوصیات خاک با عملکرد و کیفیت محصولات گزارش شدند (Oldoni et al., 2019). در این راستا Ohana-Levi et al. (2019) نیز برای جداسازی ناحیه‌های مدیریتی آبیاری از مدل خوشه‌بندی چندمتغیره وزنی استفاده کردند. به‌همین ترتیب Zeraatpishe et al. (2020) نیز برای جداسازی اراضی برای باغات مرکبات در شمال ایران از ادغام خوشه‌بندی فازی و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده کردند و گزارش کردند که دقت این روش بسیار بالا و می‌تواند آغازی برای انجام کشاورزی دقیق باشد زیرا از لحاظ هزینه و سادگی روش، قابل‌تعمیم به سایر مناطق است.

بالا بودن سطح آب زیرزمینی در دشت‌های آبرفتی استان مازندران، اهمیت استفاده درست و مدیریت بهینه در مقدار و مکان کاربرد نهاده‌های کشاورزی بخصوص کودهای شیمیایی را به‌واسطه اثرات زیست محیطی آن دو چندان می‌کند. مدیریت ویژه مکانی تنها زمانی امکان‌پذیر است که کشاورز یا مدیر مزرعه درک دقیقی از تغییرپذیری خصوصیات خاک داشته باشد و بتواند با تقسیم مزرعه به نواحی مجزا و به ظاهر یکنواخت، مدیریت هدفمندی اعمال کند. بر این اساس، جدا کردن مناطقی با خصوصیات حاصلخیزی یکسان و مدیریت ویژه مکانی امری لازم است زیرا بالا بودن سطح آب زیرزمینی از یک طرف و مدیریت کاهش مصرف کودهای از لحاظ اقتصادی نیز بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت موضوع، باید اشاره کرد که در اراضی تخت و کم‌شیب وسیع در شالیزارهای استان مازندران، اعمال کوددهی یکنواخت بدون در نظر گرفتن تغییرپذیری ذاتی خاک، رویکردی نامناسب محسوب می‌شود. همچنین تاکنون روش استاندارد برای مدیریت این تغییرپذیری ارائه نشده است. براین اساس هدف از این تحقیق، شناسایی و ارزیابی تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک مزارع شالیزاری با استفاده از آنالیز زمین‌آماري و تعیین مرز نواحی‌های مدیریتی حاصلخیزی خاک با ادغام روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) الگوریتم خوشه‌بندی فازی و بررسی همگنی خصوصیات خاک در ناحیه‌های جدا شده است.

روش‌شناسی پژوهش

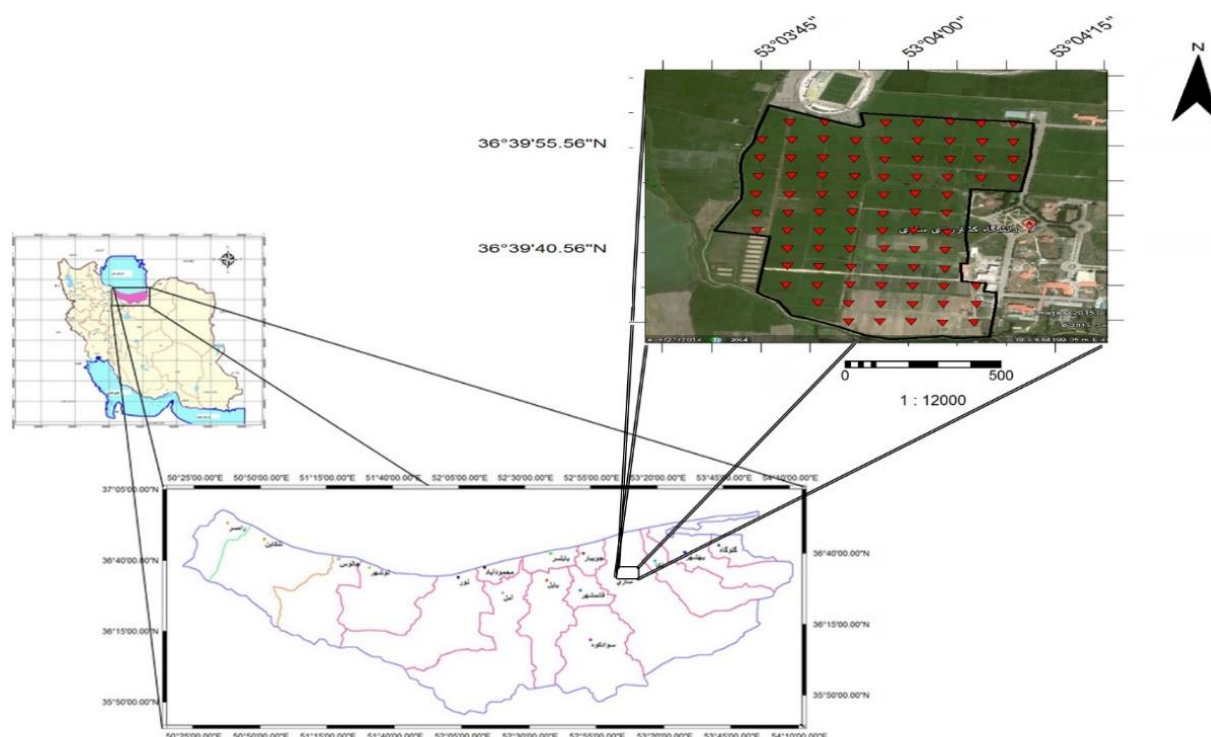
منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان ساری و در بخشی از اراضی شالیزاری آن انجام شد. مساحت منطقه مورد مطالعه ۵۴ هکتار است. خاک این منطقه برای کشاورزی و به‌خصوص کشت برنج بسیار مستعد است و از رقم‌های بومی و پر محصول در این منطقه جهت کاشت استفاده می‌شود. با این حال این منطقه دارای مدیریت کودی یکسان نیست و لازم به ذکر است در سال‌های گذشته در این منطقه، شبدر به عنوان کود سبز همراه با کاربرد گسترده کود دامی کشت شده است. همچنین از خاک بستر آب‌بندان نیز به‌منظور بهبود بافت خاک و افزایش مواد آلی در این منطقه استفاده شده است. در شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و محل نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد.

جمع‌آوری نمونه‌های خاک به‌صورت مرکب و در فواصل منظم ۸۰×۸۰ متر از کل منطقه مورد مطالعه ۸۵ نمونه خاک برداشته شد. عملکرد شلتوک ۱۵ کرت در زمان برداشت محصول نیز ثبت شد. نمونه‌های خاک، هوا خشک شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و برخی خصوصیات خاک مانند pH خاک در گل اشباع (Westerman, 1991)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (Westerman, 1991)، بافت به‌روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1985)، کربن آلی خاک به‌روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1982)، نیتروژن کل به‌روش کج‌دال (Bremner and Mulvaney, 1982)، نیتروژن نیتراتی به‌روش رنگ‌سنجی (Vendrell and Zupancic, 1990)، فسفر قابل جذب به‌روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، پتاسیم قابل جذب توسط روش استات آمونیوم (Richards, 1954)، مقدار قابل جذب عناصر کم‌مصرف مانند مس، آهن، روی و منگنز عصاره‌گیری شده با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. پس از تعیین اطلاعات اولیه آماری، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها انجام گرفت و داده‌هایی که از توزیع نرمال برخوردار نبودند با روش لگاریتم و یا به‌روش

باکس-کاکس، نرمال شدند. الگوی تغییرات مکانی و درجه پیوستگی مکانی متغیرها با استفاده از تابع نیم تغییرنمای تجربی $\gamma(h)$ محاسبه گردید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad \text{رابطه ۱}$$

در فرمول فوق $\gamma(h)$ نیم تغییرنمای تجربی، $N(h)$ تعداد جفت نقاطی است که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند. $Z(x_i+h)$ و $Z(x_i)$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده متغیر Z در نقاط x_i و x_i+h هستند. سپس مدل‌های نیم تغییرنمای مانند کروی، نمایی، گوسی و خطی بر نیم تغییرنمای تجربی برازش داده شد. روش‌های مورد استفاده به منظور درون‌یابی خصوصیات خاک در این مطالعه شامل سه روش درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK)، روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) با سه توان ۱، ۲ و ۳ و روش شبیه‌سازی شرطی با سه آشکارسازی (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ بودند).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان ساری و نقاط نمونه برداری

برای انجام این روش‌ها و برازش نیمه‌تغییرنمای نرم‌افزار GS+ استفاده شد. جهت مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی، ۲۰ درصد از داده‌ها (۱۷ نمونه) از ۸۵ نقطه‌ای نمونه‌برداری شده به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان مجموعه داده‌های معیار از کلیه تجزیه و تحلیل‌هایی که تاکنون شرح داده شد، کنار گذاشته شد. به این ترتیب با استفاده از روش‌های درون‌یابی ذکر شده، داده‌های تخمینی نقاط کنترل یا مجموعه داده‌های معیار نیز تخمین زده شد که از این داده‌ها جهت صحت‌سنجی و دقت روش درون‌یابی خصوصیات خاک استفاده گردید. با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده ($nRMSE$) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) که در زیر فرمول‌های محاسباتی آن‌ها آورده شده است، ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی انجام شد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \times \frac{100}{\bar{N}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n \bar{O}_i} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این روابط، n تعداد نمونه‌ها، O_i متغیرهای پیش‌بینی شده، P_i متغیرهای مشاهده شده، O' میانگین متغیرهای پیش‌بینی شده، P' میانگین متغیرهای مشاهده شده و $\bar{N}$ میانگین مقادیر مشاهده شده است. هنگامی که $nRMSE$ کمتر از ۱۰ درصد است، نتایج به‌عنوان درون‌یابی عالی در نظر گرفته می‌شود. وقتی ۱۰ درصد $>nRMSE$ ۲۰ درصد باشد، درون‌یابی خوب است. زمانی که ۲۰ درصد $>nRMSE$ ۳۰ درصد درون‌یابی متوسط است و زمانی که $nRMSE$ بیش‌تر از ۳۰ درصد باشد، درون‌یابی ضعیف در نظر گرفته می‌شود (Dettori et al., 2011). برای معیار CRM، مقادیر منفی و مثبت نشان می‌دهد که مدل‌ها به‌ترتیب داده‌های مشاهده شده را بیش از حد برآورد و دست کم می‌گیرند.

بعد از بدست آوردن بهترین روش درون‌یابی، پهنه‌بندی هر یک از خصوصیات خاک با در نظر گرفتن کل داده‌ها و با استفاده از نرم‌افزار ILWIS 3.3 صورت پذیرفت. برای آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) از نرم افزار SPSS استفاده شد و مؤلفه‌هایی که مقدار ویژه آن‌ها از عدد یک بیش‌تر بود، انتخاب شدند (Zeraatpisheh et al., 2020). این نوع تجزیه و تحلیل معمولاً یک تجزیه نهایی تلقی نمی‌شود بلکه به‌عنوان وسیله‌ای میانی برای مطالعات و بررسی‌های بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاهش حجم داده‌ها هدف اصلی این تجزیه را تشکیل می‌دهد که این داده‌ها شامل تعداد زیادی متغیرهای با همبستگی‌های درونی می‌باشند. این امر از طریق تبدیل داده‌ها به متغیرهای جدیدی است که مؤلفه‌های اصلی نامیده شده و غیر همبسته بوده و به‌ترتیب اولویت‌بندی می‌شوند که تعداد اندکی از آن‌ها اغلب تغییرات موجود در متغیرهای اولیه را با خود به همراه دارند.

خوشه‌بندی از ابزارهای متداول داده‌کاوی است که با استفاده از معیارهای اندازه‌گیری فاصله، داده‌ها را به دسته‌هایی با حداکثر شباهت درون گروهی و حداقل شباهت بین گروهی تقسیم می‌کند. برخلاف خوشه‌بندی کلاسیک که در آن هر نمونه فقط به یک خوشه تعلق دارد، در خوشه‌بندی فازی یک نمونه می‌تواند به چند خوشه با درجات مختلف تعلق داشته باشد (Chaudhry et al., 2023). در این مطالعه، طبقه‌بندی c -means فازی با نرم‌افزار تحلیل گر ناحیه مدیریتی (MZA) انجام شد (Fridgen et al., 2004). این روش یک تکنیک طبقه‌بندی نظارت نشده است که با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی و پارامترهای شامل حداکثر ۳۰۰ تکرار، معیار همگرایی 0.0001 و دامنه ۲ تا ۶ خوشه اجرا گردید. توان فازی‌شدن در مقدار متعارف $1/35$ تنظیم شد (Odeh et al., 1992). انتخاب تعداد بهینه خوشه‌ها بر اساس کمینه کردن مقدار شاخص کارآمدی فازی‌شدن یا FPI و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده یا NCE بر اساس روابط زیر صورت گرفت (Fridgen et al., 2004; Odeh et al., 1992):

$$FPI = 1 - \frac{c}{c-1} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^2}{n} \right] \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$NCE = \frac{n}{n-c} \left[- \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik} \log_a (\mu_{ik})}{n} \right] \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در این روابط، c تعداد خوشه‌ها، n تعداد مشاهدات، μ_{ik} درجه عضویت فازی و $\log_a$ لگاریتم طبیعی است. شاخص FPI (در دامنه صفر تا یک) میزان تفکیک‌پذیری خوشه‌ها را نشان می‌دهد، به‌طوری که مقدار صفر نشانگر تفکیک کامل و یک بیانگر همپوشانی کامل خوشه‌هاست. شاخص NCE نیز میزان سازمان‌یافتگی داده‌ها را ارزیابی می‌کند. تعداد بهینه خوشه‌ها زمانی حاصل می‌شود که هر دو شاخص به حداقل مقدار خود برسند، که نشان‌دهنده کم‌ترین همپوشانی و بیش‌ترین نظم در توزیع داده‌هاست. پس از تعیین خوشه‌های بهینه، آنالیز واریانس یکطرفه برای متغیرهای هر ناحیه انجام و در نهایت نقشه نواحی مدیریتی با نرم‌افزار ILWIS3.3 ترسیم شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری داده‌های خاک

خلاصه آماری داده‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده‌است. در این جدول برخی پارامترهای آماری نظیر کمینه، بیشینه، میانگین، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات آمده است. طبق این جدول کم‌ترین مقدار pH، $7/07$ و بیش‌ترین مقدار آن $7/71$ است. ضریب تغییرات اسیدیته خاک از سایر خصوصیات خاک بررسی شده کم‌ترین مقدار ($1/84$ درصد) بود که می‌تواند به‌علت لگاریتم‌گیری ذاتی هیدروژن در بیان pH خاک و اثرپذیری زیاد آن از آهکی بودن خاک‌های منطقه باشد که منجر به تغییرات کم آن در منطقه شده است. مقدار میانگین pH ($7/36$) در خاک‌های منطقه نیز نشان می‌دهد خاک‌های منطقه قلیایی و همچنین با توجه به قرارگیری در واحد فیزیوگرافی دشت‌های

آبرفتی-سیلابی دارای آهک زیاد اما جزء خاک‌های شور و سدیمی نیستند. کم‌ترین مقدار هدایت الکتریکی (EC)، ۰/۹۴ دسی زیمنس بر متر و بیش‌ترین مقدار آن ۴/۲۵ دسی زیمنس بر متر است. اگر چه عمده خاک‌های منطقه دارای شرایط غیرشور (کم‌تر از ۲ دسی‌زیمنس بر متر) هستند اما وجود تعدادی نقاط با هدایت الکتریکی بالا (نزدیک ۴ دسی زیمنس بر متر) می‌تواند به علت کیفیت آب آبیاری چاه‌های نزدیک این نقاط باشد و یا کاربرد مواد اصلاح‌کننده (کودهای آلی و شیمیایی) و پستی و بلندی‌های کوچک (Microrelief) در این خاک‌ها موجب این تغییر در میزان نمک‌های محلول شده باشد. در ضمن امکان استفاده موضعی از کودهای دامی در این اراضی و یا مکان‌هایی برای اطراق دام در یک قسمت از اراضی و همچنین استفاده موضعی از خاک‌های سیاه آبدان در سال‌های گذشته در برخی قسمت‌هایی از اراضی نیز می‌تواند تأثیر گذار باشد. این تغییرات منجر به ضریب تغییرات ۳۵ درصد این متغیر در منطقه شده است. میانگین کربن آلی و نیتروژن کل خاک به ترتیب ۲/۰۳ و ۰/۱۹۳ درصد بدست آمد که دارای ضریب تغییرات ۲۱/۳۱ و ۲۶/۴۰ درصد بودند. نیتروژن نیتراتی دارای ضریب تغییرات (۴۱ درصد) بیش‌تر از نیتروژن کل بوده و این امر می‌تواند به علت کاربرد کودهای ازته (اوره) مورد استفاده در این اراضی و همچنین ذات تحرک‌پذیری نیترات باشد که می‌تواند در خاک و در آب‌های شالیزار جابجا و تغییرات مکانی بیش‌تری در خاک‌ها را به همراه داشته باشد. میانگین غلظت فسفر قابل جذب نیز در خاک‌های منطقه

۲۶/۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است که با توجه به حد بحرانی ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دارای وضعیت مناسبی است اما وجود ضریب تغییرات بالای این عنصر (۴۶ درصد) و مقادیر بسیار کم مشاهده شده از فسفر قابل جذب در خاک‌ها (مانند ۴/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) لزوم مدیریت کاربرد کودهای فسفره در منطقه را بسیار جدی می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که وضعیت پتاسیم در خاک‌های شالیزاری منطقه نیز نیاز به توجه ویژه دارد. میانگین پتاسیم قابل جذب (۲۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) اگرچه اندکی بالاتر از حد بحرانی (۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) است، اما وجود مقادیر بسیار کم (۱۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) در برخی نقاط نشان‌دهنده توزیع ناهمگون این عنصر در منطقه می‌باشد. این ناهمگونی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد از جمله: (۱) تفاوت در سابقه مصرف کودهای پتاسیمی، (۲) تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت و ظرفیت تبادل کاتیونی، (۳) تفاوت در سیستم‌های مدیریتی کشاورزان مختلف در منطقه. همچنین، شستشوی پتاسیم در شرایط آب‌ایستایی شالیزارها می‌تواند در کاهش موضعی این عنصر مؤثر باشد. در مورد عناصر کم‌مصرف، میانگین غلظت آهن (۷۶،۳۹)، منگنز (۴۱،۲۳)، روی (۱،۹۳) و مس (۵،۷۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) نشان می‌دهد که این عناصر در محدوده قابل قبولی قرار دارند. با این حال، ضریب تغییرات بالا برای روی و منگنز (۶۲٪) حاکی از تغییرپذیری شدید این عناصر در منطقه است که می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند: (۱) تغییرات pH خاک در نقاط مختلف، (۲) تفاوت در محتوای ماده آلی، (۳) سابقه مصرف کودهای حاوی این عناصر، و (۴) شرایط اکسیداسیون-احیا در خاک‌های شالیزاری باشد. این نوسانات می‌تواند موجب بروز علائم کمبود یا سمیت در نقاط مختلف مزرعه شود. در بین داده‌های اندازه‌گیری شده مقادیر pH، EC، کربن آلی، نیتروژن کل، نیتروژن نیتراتی، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، آهن قابل جذب و مس قابل جذب از توزیع نرمال برخوردار بودند. منگنز قابل جذب با اعمال لگاریتم بر پایه عدد نپر، نرمال شد اما مقدار رس، سیلت، شن و روی قابل جذب خاک با روش باکس-کاکس و نرم افزار Develve با لاندهای به ترتیب ۲/۸، ۱/۱۸، ۳/۶۳- و ۰/۱۸- نرمال شدند که از داده‌های تبدیل شده در تجزیه و تحلیل‌های بعدی از آن استفاده شد.

جدول ۲ نشان می‌دهد که بین خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه روابط همبستگی پیچیده‌ای وجود دارد. pH خاک با بیش‌تر پارامترها (به جز ظرفیت تبادل کاتیونی، بافت خاک، آهن و فسفر) همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح ۱ درصد نشان داد، به‌ویژه با هدایت الکتریکی ($r^2 = -0.60^{***}$) که قوی‌ترین رابطه منفی بود. هدایت الکتریکی با نیتروژن نیتراتی ($r^2 = 0.357^{**}$)، پتاسیم قابل جذب ($r^2 = 0.581^{**}$) و با روی ($r^2 = 0.399^{**}$) رابطه مثبت داشت. ماده آلی خاک نقش محوری ایفا می‌کرد، به‌طوری که با تمام عناصر کم‌مصرف (آهن، روی، مس و منگنز) و همچنین نیتروژن کل ($r^2 = 0.792^{**}$) و نیتروژن نیتراتی ($r^2 = 0.615^{**}$) همبستگی مثبت قوی نشان داد. جالب‌اینکه نیتروژن کل و ماده آلی تقریباً الگوی همبستگی یکسانی با سایر پارامترها داشتند که نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ چرخه کربن و نیتروژن است. پتاسیم قابل جذب با pH خاک ($r^2 = -0.432^{**}$)، رابطه منفی و با قابلیت هدایت الکتریکی ($r^2 = 0.581^{**}$) و ظرفیت تبادل کاتیونی ($r^2 = 0.720^{**}$) همبستگی مثبت قوی داشت. این یافته‌ها حاکی از آن است که ماده آلی خاک به‌عنوان شاخص کلیدی، همبستگی گسترده‌ای با حاصلخیزی خاک دارد، درحالی که pH و هدایت الکتریکی به‌عنوان عوامل تعدیل‌کننده بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی تأثیر متضادی می‌گذارند. همبستگی مناسب خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد این مواد از لحاظ پدوژنتیکی دارای منشاء یکسان هستند و می‌توان با آنالیز مؤلفه‌های اصلی امکان کاهش تعداد داده و شناسایی مؤلفه‌های کم‌تر پرداخت تا بتوان ضمن در نظر گرفتن تغییرات در خصوصیات خاک بتوان مناطق همگن در منطقه را شناسایی و جداسازی کرد.



جدول ۱. خلاصه آمار توصیفی متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه (n=۸۵)

متغیرها	کمینه	بیشینه	میانگین	ضریب تغییرات (%)	K-S p ^۱
pH	۷/۰۷	۷/۷۱	۷/۳۶	۱/۸۴	۰/۷۱۶
^۱ EC	۰/۹۴	۴/۲۵	۲/۶۲	۳۵/۳۵	۰/۰۷۳
^۲ OC	۰/۷۵	۳/۲۹	۲/۰۳	۲۱/۳۱	۰/۱۶۲
^۳ TN	۰/۰۹	۰/۲۹۹	۰/۱۹۳	۲۶/۴۰	۰/۱۷۰
^۴ N-NO ₃ ⁻¹	۵/۲۰	۲۷/۴۸	۱۵/۶۷	۴۱/۰۳	۰/۹۷۱
^۵ CEC	۹/۰۰	۴۹/۰۰	۳۶/۶۲	۲۱/۲۹	۰/۱۲۳
^۶ Clay	۱۰/۰۰	۴۳/۰۰	۱۷/۴۶	۷/۸۹	۰/۰۷۲
^۷ Sand	۳۹/۰۰	۶۱/۰۰	۴۵/۹۲	۳۶/۱۵	۰/۰۵۱
^۸ Av-P	۴/۳	۴۵/۸۳	۲۶/۸۵	۴۶/۶۶	۰/۰۹۴
^۹ Av-K	۱۳۲/۰	۴۰۸/۹	۲۶۰/۶	۲۷/۱۸	۰/۲۳۵
^{۱۰} Av-Fe	۱۳/۱۷	۱۳۳/۷۲	۷۶/۳۹	۳۵/۹۵	۰/۶۱۳
^{۱۱} Av-Mn	۷/۲۳	۱۰۴/۰۴	۴۱/۲۳	۶۲/۹۳	۰/۰۸۴
^{۱۲} Av-Zn	۰/۳۶	۷/۶۸	۱/۹۳	۶۲/۲۴	۰/۱۴۲
^{۱۳} Av-Cu	۱/۹۳	۸/۴۲	۵/۷۸	۲۴/۰۶	۰/۳۲۰

^۱ هدایت الکتریکی (ds/m)؛ ^۲ کربن آلی (%)؛ ^۳ نیتروژن کل (%)؛ ^۴ نیتروژن نیتراتی (mg/kg)؛ ^۵ ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol+/kg)؛ ^۶ رُس (%)؛ ^۷ شن (%)؛ ^۸ فسفر قابل جذب (mg/kg)؛ ^۹ پتاسیم قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۰} آهن قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۱} منگنز قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۲} روی قابل جذب (mg/kg) و ^{۱۳} مس قابل جذب (mg/kg).

جدول ۲. ضریب همبستگی پیرسون بین خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه

متغیرها	Av-Zn	Av-Mn	Av-Fe	Av-K	Av-P	Sand	Clay	CEC	N-NO ₃ ⁻¹	TN	OC	EC	pH
pH	-۰/۳۶۷**	-۰/۳۳۴**	-۰/۱۷۲	-۰/۴۳۲**	-۰/۰۸۵	-۰/۱۱۷	-۰/۱۹۱	۰/۰۶۳	-۰/۳۹۹**	-۰/۲۹۸**	-۰/۲۵۹**	-۰/۰۶۰۲**	۱
^۱ EC	۰/۱۰۴	۰/۳۹۹**	-۰/۱۴۱	۰/۵۸۱**	۰/۰۷۷	۰/۱۷۳	-۰/۱۵۲	۰/۰۶۶	۰/۳۵۷**	۰/۱۵۷	۰/۱۵۶	۱	
^۲ OC	۰/۴۸۹**	۰/۳۳۰**	۰/۳۸۳**	۰/۴۷۷**	۰/۲۷۱*	-۰/۰۲۵	-۰/۰۸۳	۰/۵۱۶**	۰/۶۱۵**	۰/۷۹۲**	۱		
^۳ TN	۰/۳۹۵**	۰/۴۲۵**	۰/۳۰۱*	۰/۲۸۶**	۰/۵۴۱**	-۰/۰۱۱	-۰/۰۵۵	۰/۴۶۵**	۰/۶۸۴**	۱			
^۴ N-NO ₃ ⁻¹	۰/۳۹۱**	-۰/۵۹۵**	۰/۱۸۳	۰/۲۴۷*	۰/۷۲۰**	۰/۳۱۹**	۰/۰۱۱	-۰/۴۷۲**	۱				
^۵ CEC	۰/۳۱۴**	-۰/۱۵۲	۰/۰۹۵	۰/۲۰۲	۰/۳۳۶**	۰/۲۸۸**	-۰/۳۱۵**	۰/۲۷۱*	۱				
^۶ Clay	۰/۰۵۹	۰/۰۹۵	-۰/۱۵	-۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	۰/۲۰۲	-۰/۸۲۷**	۱					
^۷ Sand	۰/۲۰۸	-۰/۰۰۷	۰/۰۲۴	-۰/۰۷۷	-۰/۰۴۲	-۰/۱۳۹	۱						
^۸ Av-P	۰/۰۶۳	۰/۲۸۵**	۰/۰۳۲	-۰/۱۶۵	۰/۵۱۵**	۱							
^۹ Av-K	۰/۱۰۲	۰/۵۶۰**	۰/۰۹۸	-۰/۱۵۰	۱								
^{۱۰} Av-Fe	۰/۸۴۶**	۰/۰۹۶	۰/۰۶۶**	۱									
^{۱۱} Av-Mn	۰/۷۱۲**	۰/۲۰۸**	۱										
^{۱۲} Av-Zn	۰/۳۳۳**	۱											
^{۱۳} Av-Cu	۱												

^۱ هدایت الکتریکی (ds/m)؛ ^۲ کربن آلی (%)؛ ^۳ نیتروژن کل (%)؛ ^۴ نیتروژن نیتراتی (mg/kg)؛ ^۵ ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol+/kg)؛ ^۶ رُس (%)؛ ^۷ شن (%)؛ ^۸ فسفر قابل جذب (mg/kg)؛ ^۹ پتاسیم قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۰} آهن قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۱} منگنز قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۲} روی قابل جذب (mg/kg) و ^{۱۳} مس قابل جذب (mg/kg).

* نشان دهنده معنی داری در سطح ۵ درصد، ** نشان دهنده معنی داری در سطح ۱ درصد.

تعیین بهترین روش درون یابی برای خصوصیات خاک

همان طور که در بخش روش شناسی پژوهش بیان شد، برای میان یابی خصوصیات خاک از روش های وزن دهی معکوس فاصله، کریجینگ معمولی و شبیه سازی شرطی استفاده شد. به منظور ارزیابی روش های مذکور، ۸۰ درصد داده ها به صورت تصادفی را برای تخمین (داده های آموزش، n=۶۸) و ۲۰ درصد داده ها (داده های آزمون، n=۱۷) را برای ارزیابی صحت پیش بینی خصوصیات خاک استفاده گردید. سپس برای مقایسه دقت تخمین گرها از آماره های ضریب تعیین (R²)، جذر میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳ و برای هر یک از پارامترها بر اساس کمترین nRMSE و بیشترین R² یکی از

روش‌های درون‌یابی انتخاب شد. nRMSE نشان‌دهنده‌ی صحت تخمین است و هر روشی که nRMSE آن کوچک‌تر باشد، صحت آن بیش‌تر است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شد، برای کربن آلی، نیتروژن کل، ظرفیت تبادل کاتیونی و رس روش کریجینگ معمولی به‌عنوان بهترین روش انتخاب شد. برای pH، EC، فسفر و منگنز قابل‌دسترس، روش وزن‌دهی معکوس فاصله به‌ترتیب با توان‌های ۳، ۲ و ۱ دارای بیش‌ترین دقت بودند. اما برای درون‌یابی نیتروژن-نیتراتی، پتاسیم و روی قابل‌جذب روش شبیه‌سازی شرطی با ۱۰۰۰ بار آشکارسازی بهترین نتیجه را داشت.

جدول ۳. تعیین بهترین روش درون‌یابی برای خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه

پارامترها	بهترین روش درون‌یابی	CRM	nRMSE	R2
pH	IDW با توان ۳	۰/۲۱	۲۵	۰/۶۷
^۱ EC	IDW با توان ۲	۰/۴۵	۱۸	۰/۵۸
^۲ OC	کریجینگ معمولی	۰/۲۶	۱۱	۰/۶۸
^۳ TN	کریجینگ معمولی	۰/۰۵۴	۳	۰/۵۳
^۴ N-NO ₃ ⁻¹	شبیه‌سازی شرطی (n=۱۰۰۰)	۴/۴۱	۶	۰/۶۳
^۵ CEC	کریجینگ معمولی	-۴/۶	۵	۰/۵۸
^۶ Clay	کریجینگ معمولی	۶/۸	۷	۰/۶۴
^۷ Av-P	IDW با توان ۳	۷/۶	۵	۰/۷۴
^۸ Av-K	شبیه‌سازی شرطی (n=۱۰۰۰)	-۱۱/۴۲	۱۴	۰/۵۵
^۹ Av-Fe	کریجینگ معمولی	-۱۴/۱	۱۸	۰/۴۲
^{۱۰} Av-Mn	IDW با توان ۲	۱۲/۱	۱۵	۰/۶۱
^{۱۱} Av-Zn	شبیه‌سازی شرطی (n=۱۰۰۰)	۲/۲	۱۳	۰/۵۱
^{۱۲} Av-Cu	کریجینگ معمولی	۱/۳	۱۲	۰/۶۰

^۱ هدایت الکتریکی (dS/m)؛ ^۲ کربن آلی (%)؛ ^۳ نیتروژن کل (%)؛ ^۴ نیتروژن نیتراتی (mg/kg)؛ ^۵ ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol+/kg)؛ ^۶ رس (%)؛ ^۷ فسفر قابل‌جذب (mg/kg)؛ ^۸ پتاسیم قابل‌جذب (mg/kg)؛ ^۹ آهن قابل‌جذب (mg/kg)؛ ^{۱۰} منگنز قابل‌جذب (mg/kg)؛ ^{۱۱} روی قابل‌جذب (mg/kg) و ^{۱۲} مس قابل‌جذب (mg/kg).

طبق نتایج Shahinzadeh et al. (2022) روش تابع پایه شعاعی (RBF) می‌تواند دقت بالاتری برای تخمین هدایت الکتریکی، آهن، شن و سیلت ارائه دهد و کریجینگ معمولی روش دقیق‌تری برای تخمین pH، پتاسیم قابل‌جذب و رس در اراضی کشاورزی است. در مطالعه‌ای دیگر توسط Vasu et al. (2021) با هدف مدل‌سازی تغییرپذیری مکانی ریزمغذی‌های خاک در زمین‌های زراعی Telangana، Mahabubnagar، Thimmajipet، هند، ۱۵۰۸ نمونه خاک سطحی (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) نمونه‌برداری شد. نتایج نشان داد که همه ریزمغذی‌ها به شدت تغییر کردند (CV>35%) که به‌ترتیب روی<آهن<مس<بور<منگنز بیشترین تغییرات را داشتند. آنان دریافتند مدل کروی با کمترین میزان RMSE و بالاترین میزان R² برای نقشه‌برداری از توزیع مکانی ریزمغذی‌های خاک مناسب است. همچنین اولیایی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به‌منظور ارزیابی روش‌های زمین‌آماري، به پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان در استان فارس پرداختند. در این مطالعه، ۱۳۴ نمونه خاک سطحی با الگوی شبکه‌ای یک در یک کیلومتر جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین مدل ساختار مکانی برای متغیرهای شن، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، پهاش و چگالی ظاهری، مدل نمایی بود. در حالی که مدل منطقی درجه دوم برای سیلت و مدل کروی برای رس، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها شناسایی شدند. از نظر شدت ساختار مکانی، کربنات کلسیم معادل دارای ساختار ضعیف، کربن آلی ساختار متوسط و سایر متغیرها از ساختار مکانی قوی برخوردار بودند. مطالعه‌ای در باغات میوه منطقه کشمیر هند به بررسی تغییرات مکانی خاک با به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماري پرداخت. در این پژوهش، توزیع مکانی خصوصیات خاک شامل pH، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم با استفاده از کریجینگ معمولی و بر اساس مدل کروی انجام شد. همچنین، مدل نمایی برای قابلیت هدایت الکتریکی و کربن آلی، و مدل گوسی برای منیزیم به کار گرفته شد. انتخاب این مدل‌ها بر اساس مقادیر میانگین مربعات خطا صورت پذیرفت (Bangroo et al., 2021). ایوبی و همکاران (۱۳۹۵) دریافتند که عناصر فسفر، پتاسیم و کربن آلی دارای وابستگی مکانی متوسط هستند که این حالت نشان‌دهنده این است که فاکتورهای مدیریتی مانند کوددهی، تأثیر بیش‌تری بر تغییرپذیری مکانی این



عناصر داشتند. برای پتاسیم و کربن آلی بهترین روش زمین آماری کربجینگ معمولی بود و بهترین مدل برازش داده شده نیز مدل نمایی بدست آمد. پژوهش Barrena-González et al. (2022) به منظور تعیین بهترین روش درون یابی ۱۲ پارامتر خاک در ۳ بازه عمق مختلف ۵-۰، ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی متری انجام شد. به طور خلاصه آنان برای پارامتر رس در عمق ۵-۰ خاک روش کربجینگ بیزی تجربی (EBK) را دقیق عنوان کردند در حالی که برای عمق ۵ تا ۱۰ سانتی متری روش IDW بهتر عنوان کردند.

آنالیز مؤلفه های اصلی

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، چهار مؤلفه اصلی مقدار ویژه آن ها بالای یک بود، که مؤلفه اول، ۳۸/۷۸ درصد از کلی تغییرات و مؤلفه های دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۱۷/۸۲، ۱۴/۱۹ و ۸/۶۹ درصد از تغییرات را توجیه کرده اند که جمعاً توانسته اند ۷۹/۴۹ درصد از کل تغییرات داده ها را توجیه کنند. بارگزاری مؤلفه اصلی یا PC loading، ضرایب همبستگی بین مؤلفه های اساسی و متغیرهای اولیه می باشد. این ضرایب اهمیت هر متغیر را در میزان پراکندگی در نظر گرفته شده در محاسبه هر مؤلفه اصلی (PC) را نشان می دهد. همبستگی بالا بین متغیرهای کربن آلی، نیتروژن کل، نیتروژن نیتراتی، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، مس و روی قابل جذب و مؤلفه اصلی اول نشان دهنده این موضوع است که این متغیرها در جهت حداکثر پراکندگی مجموعه داده ها است. در واقع بیش تر از یک متغیر دارای همبستگی بالا با مؤلفه اول بودند. نتایج نشان می دهد با افزایش مؤلفه اصلی اول کربن آلی، نیتروژن کل، نیتروژن نیتراتی، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب و مس قابل جذب افزایش می یابند در حالی که روی قابل جذب با همبستگی بالا کاهش می یابد. با افزایش یکی از این متغیرها سایر پارامترهای همسو افزایش، اما روی کاهش یافته است. همبستگی بالای کربن آلی، نیتروژن کل و نیتروژن نیتراتی به همراه پتاسیم و مس با مؤلفه اصلی اول نشان دهنده اهمیت بالای این متغیرها در شناسایی تغییرات خصوصیات خاک می باشد. همبستگی بالای متغیرهایی مانند پتاسیم، آهن، منگنز و مس با مؤلفه دوم نشان دهنده این است که متغیرهای مذکور در پراکندگی باقیمانده از مجموعه داده های اصلی که مؤلفه اول آن را در نظر نگرفته است نقش اساسی داشته است. متغیرهای pH، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، رس همبستگی بالا با مؤلفه سوم و تنها رس دارای همبستگی با مؤلفه چهارم داشته است که نشان دهنده اهمیت کم رس در توجیه تغییرات خصوصیات خاک است. در واقع با توجه به آنالیز مؤلفه اصلی، متغیرهایی با اهمیت زیاد (مانند کربن آلی، نیتروژن کل، نیتروژن نیتراتی، پتاسیم قابل جذب و روی قابل جذب) و یا دارای اهمیت کم (آهن، منگنز و مس) شناسایی و مشخص شدند.

مشابه تحقیق ما Jena et al. (2024) در پژوهش خود جهت بررسی مدیریت ویژه مکانی عناصر غذایی از تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی نیز استفاده کردند. آن ها بیان کردند ۳ مؤلفه اصلی که بیش از ۵۷ درصد از واریانس کل را تشکیل دادند دارای مقادیر ویژه بیش تر از ۱ بوده که مؤلفه اول تحت تأثیر متغیرهای پتاسیم و منگنز قابل دسترس بودند، بیش از ۲۸ درصد از واریانس کل را شامل شدند. مؤلفه دوم و سوم نیز به ترتیب ۱۶/۳۹ و ۱۲/۹۳ درصد از واریانس کل را تشکیل دادند که عناصر غالب آن ها به ترتیب نیتروژن قابل دسترس، کربن آلی، آهن، روی و مس بودند. به طور مشابه Aggag and Alharbi (2022) در مجموع ۱۱۱ نمونه خاک از ۳۷ پروفیل خاک در اعماق ۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی متر از منطقه ساوت هیل، عربستان سعودی جمع آوری کردند. طبق این مطالعه تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی منجر به شش مؤلفه اصلی شد که ۷۹/۷۵ درصد از کل واریانس ویژگی های خاک را توضیح می دادند. مؤلفه اول به شدت تحت تأثیر چگالی ظاهری خاک، رطوبت ظرفیت مزرعه، رس، نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع و شن خاک قرار داشت. مؤلفه دوم تحت تأثیر نیتروژن، هدایت الکتریکی و آهک بود، در حالی که مؤلفه سوم از pH تأثیر می گرفت. همچنین مؤلفه چهارم با پتاسیم و فسفر مشخص شده بود و به همین ترتیب مؤلفه پنجم عمدتاً تحت تأثیر آهن، منگنز و مس بود. در نهایت مؤلفه ششم عمدتاً وابسته به رطوبت اشباع و روی قرار بود. مؤلفه های اصلی در این تحقیق برای مشخص کردن ناحیه های مختلف مدیریتی توسط آنالیز خوشه ای مورد استفاده قرار داده شد که نقشه ی پراکنش مکانی چهار مؤلفه اصلی در شکل ۲ نشان داده شده است.

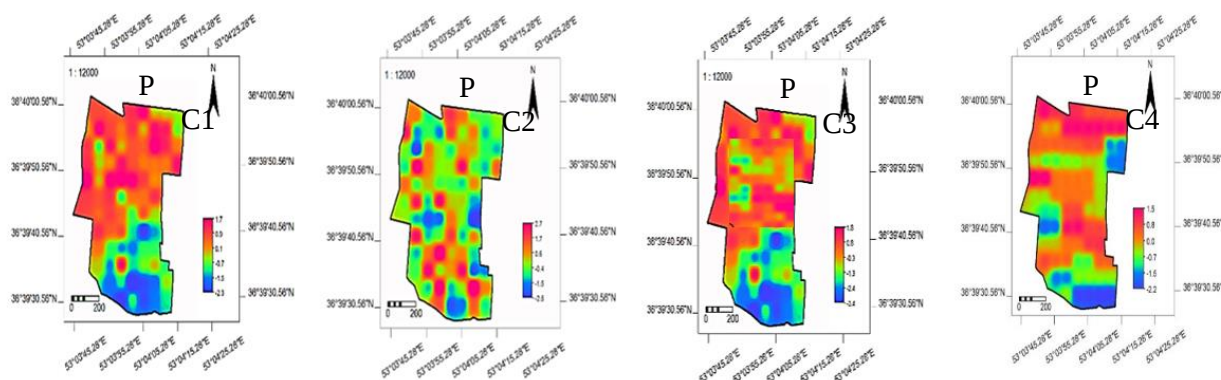
جدول ۴. ضرایب همبستگی بین متغیرها و مؤلفه های اصلی (PC Loading)

مؤلفه های اصلی	ارزش ویژه	درصدی از واریانس	واریانس تجمعی (%)
مؤلفه اول (PC1)	۵/۱۲۵	۳۸/۷۸	۳۸/۷۸
مؤلفه دوم (PC2)	۲/۳۱۷	۱۷/۸۲	۵۶/۶۰
مؤلفه سوم (PC3)	۱/۸۴۵	۱۴/۱۹	۷۰/۷۹
مؤلفه چهارم (PC4)	۱/۱۳۱	۸/۶۹	۷۹/۴۹

جدول ۵. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای خصوصیات خاک و ضرایب بارگذاری متغیرها

متغیرها	مؤلفه اول (PC1)	مؤلفه دوم (PC2)	مؤلفه سوم (PC3)	مؤلفه چهارم (PC4)
pH	-۰/۴۴۰	۰/۰۲۴	۰/۶۴۸	-۰/۰۷۲
^۱ EC	۰/۴۵۳	-۰/۳۹۱	-۰/۵۸۴	۰/۱۹۲
^۲ OC	۰/۸۶۷	۰/۰۳۹	۰/۲۷۸	-۰/۳۳۷
^۳ TN	۰/۸۶۶	۰/۰۳۷	۰/۲۷۶	-۰/۳۴۰
^۴ N-NO ₃ ⁻¹	۰/۸۸۶	-۰/۱۸۱	۰/۰۹۶	-۰/۲۵۵
^۵ CEC	۰/۵۱۱	-۰/۰۲۴	۰/۵۹۷	۰/۰۸۵
^۶ Clay	-۰/۰۸۳	-۰/۰۷۶	۰/۵۲۹	۰/۶۶۴
^۷ Av-P	۰/۵۵۳	-۰/۴۹۲	۰/۳۷۷	۰/۳۲۲
^۸ Av-K	۰/۷۰۶	-۰/۵۸۲	-۰/۰۸۰	۰/۱۶۱
^۹ Av-Fe	۰/۴۳۲	۰/۸۳۱	۰/۰۶۲	۰/۰۴۹
^{۱۰} Av-Mn	۰/۴۷۷	۰/۵۶۶	-۰/۲۸۰	۰/۳۵۹
^{۱۱} Av-Zn	-۰/۷۴۰	۰/۲۵۵	۰/۲۳۵	-۰/۱۷۱
^{۱۲} Av-Cu	۰/۶۳۷	۰/۶۸۲	-۰/۰۱۲	۰/۲۳۷

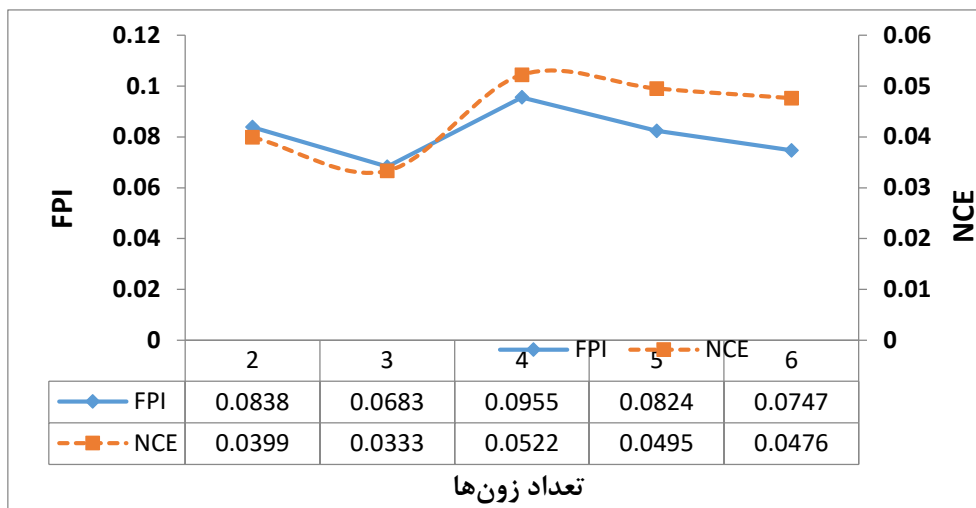
^۱ هدایت الکتریکی (dS/m)؛ آکربن آلی (%)؛ نیتروژن کل (%)؛ نیتروژن نیتراتی (mg/kg)؛ ^۵ ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol+/kg)؛ ^۶ رس (%)؛ فسفر قابل جذب (mg/kg)؛ ^۸ پتاسیم قابل جذب (mg/kg)؛ ^۹ آهن قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۰} منگنز قابل جذب (mg/kg)؛ ^{۱۱} روی قابل جذب (mg/kg) و ^{۱۲} مس قابل جذب (mg/kg).



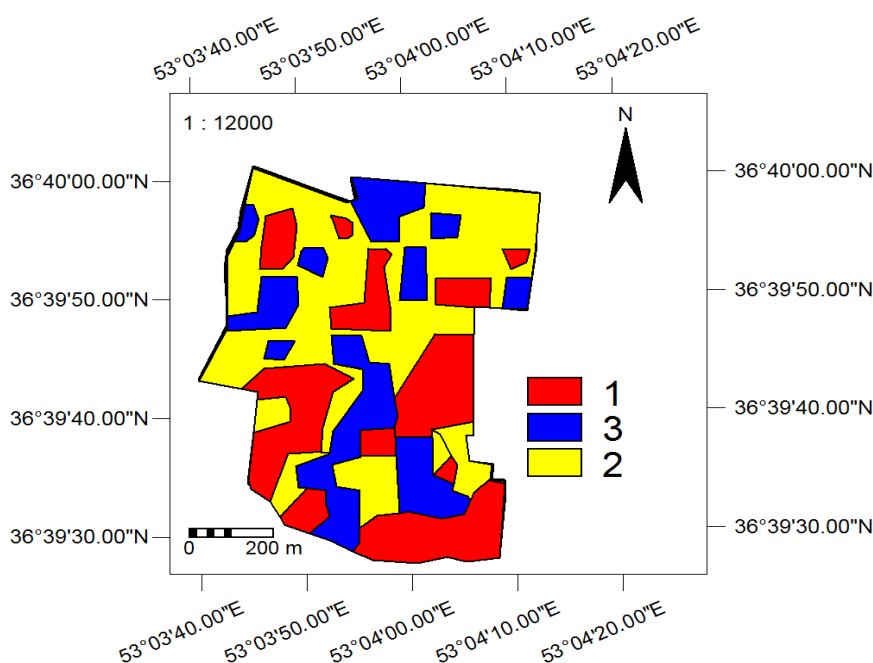
شکل ۲. نقشه‌های پراکنش مکانی مؤلفه اصلی اول (PC1)، مؤلفه اصلی دوم (PC2)، مؤلفه اصلی سوم (PC3) و مؤلفه اصلی چهارم (PC4)

آنالیز خوشه‌بندی فازی

در این مطالعه از شاخص عملکرد فازی (FPI) و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده (NCE) برای تعیین تعداد بهینه خوشه (ناحیه) استفاده شد که توسط نرم‌افزار تحلیل‌گر ناحیه مدیریتی محاسبه شدند. در شکل ۳ مقادیر FPI و NCE برای ۲ الی ۶ ناحیه ترسیم شده است. تعداد بهینه خوشه، زمانی که هر دو شاخص در حداقل باشد، تعیین گردید. FPI و NCE در تعداد ناحیه ۳ به ترتیب ۰/۰۶۸۳ و ۰/۰۳۳۳ بدست آمد و به همین علت تعداد بهینه خوشه برای منطقه مورد مطالعه ۳ تعیین شد. نقشه مناطق (ناحیه‌های) مدیریتی برای تعداد بهینه خوشه در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نقشه بدست آمده ۱۸/۳۴ هکتار از اراضی مورد مطالعه در ناحیه ۱ (۳۱/۸۳ درصد)، ۲۶/۱۵ هکتار در ناحیه ۲ (۴۵/۳۹ درصد) و ۱۳/۱۲ هکتار در ناحیه ۳ (۲۲/۷۷ درصد) قرار گرفتند.



شکل ۳. شاخص عملکرد فازی (FPI) و آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده (NCE) برای کلاس‌های اختصاص داده شده



شکل ۴. نقشه توزیع مکانی سه ناحیه مدیریتی جدا شده در منطقه مورد مطالعه

به‌طور مشابه Bhagwan et al. (2023) با بررسی ۲۰۰ نمونه خاک به‌روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی (c-means) سه منطقه مدیریتی (MZ) با استفاده از دو شاخص FPI و NCE را شناسایی کردند. آنان عنوان کردند این مناطق به‌طور قابل‌توجهی با یکدیگر متفاوت بودند به‌طوری‌که MZ_1 ۴۵/۵ درصد، MZ_2 ۲۹/۵ درصد و MZ_3 ۲۵ درصد مساحت را پوشش دادند. در مطالعه‌ی دیگر Shashikumar et al. (2023) ۶۵ نمونه خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از منطقه‌ای به‌وسعت ۱۰۲ هکتار واقع در ایالت اوتاراکنند هند را بررسی کردند. تحلیل زمین آماری، الگوی توزیع مکانی متغیرهای خاک را با وابستگی متوسط تا ضعیف نشان داد. با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ۵ مؤلفه اصلی با مقدار ویژه بیش از ۱ با واریانس کل ۶۹/۴۸ آشکار شد. در نهایت تحلیل زمین آماری، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش الگوریتم خوشه‌بندی فازی c-mean منجر به ایجاد ۴ منطقه مدیریتی گردید. همچنین Metwally et al. (2019) نیز ۱۰۰ نمونه خاک در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری را جهت مدیریت مؤثر عناصر غذایی و ارزیابی تنوع مکانی آن‌ها با روش‌های تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی بررسی کردند که در نهایت منجر به ۳ منطقه مدیریتی بر اساس ۲ معیار آنتروپی پارتیشن اصلاح شده (MPE) و شاخص عملکردی فازی (FPI) شد. به‌طور مشابه Nogueira Martins et al. (2019) نیز با هدف تعیین مناطق مدیریتی در مزرعه سویا با استفاده از روش‌های زمین آماری، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی

k-means با استفاده از ۲ معیار FPI و NCE در نهایت موفق به تشخیص دو منطقه مدیریتی شدند. پژوهش Aliyu et al. (2020) به منظور درک تغییرپذیری مکانی خواص خاک و تعیین مناطق مدیریتی عناصر غذایی در مناطق کشت ذرت در نیجریه اجرا کردند. آنان جهت بررسی توزیع مکانی و تنوع پارامترهای حاصلخیزی خاک از روش زمین آمار و کریجینگ معمولی استفاده کردند، در حالی که از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی k-means برای تعیین نواحی مدیریتی استفاده کردند. در پایان ۴ منطقه مدیریتی شناسایی شدند که منطقه یک و چهار دارای شاخص حاصلخیزی بالاتری بودند. در مطالعه‌ای دیگر با هدف تهیه نقشه حاصلخیزی خاک و تعیین نواحی مدیریتی منطقه ساحلی شرقی هند، ۸۵ نمونه خاک در عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری را با روش‌های تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی c-mean با دو معیار MPE و FPI بررسی شد. ۵ ناحیه مدیریتی مشخص شد که تفاوت معناداری در بین مناطق با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس نمایان شد (Srinivasan et al., 2022).

بعد از شناسایی ناحیه‌های مختلف مدیریتی برای شناسایی تغییرات خصوصیات خاک‌ها در ناحیه‌ها جدا شده و اعمال مدیریت یکپارچه در ناحیه‌های جدا شده، میانگین خصوصیات خاک‌های اندازه‌گیری شده در هر ناحیه مقایسه شدند. در جدول ۶ تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه از خصوصیات خاک برای سه منطقه مدیریتی نشان داده شده است. تغییرات خصوصیات خاک اندازه‌گیری شده در ناحیه‌های مختلف نیز اختلاف معنی‌داری را در برخی از خصوصیات نشان داد. تغییرات معنی‌دار مشاهده در ناحیه‌های مختلف در سطح ۵ درصد در خصوصیات خاک و عملکرد شلتوک برنج در ناحیه‌های جدا شده نشان‌دهنده عملکرد مناسب استفاده از روش‌های فازی و زمین آمار است. عملکرد شلتوک برنج نیز به ترتیب در ناحیه‌های یک، دو و سه به ترتیب ۵۴۲۶، ۵۹۶۲ و ۶۳۲۵ کیلوگرم در هکتار بود.

نتایج جدول ۶ نشان داد که pH در ناحیه سه (۷/۲۸) نسبت به نواحی یک (۷/۴۲) و دو (۷/۳۷) کاهش معنی‌داری در سطح ۵ درصد داشت که احتمالاً به دلیل کاربرد بیشتر کود حیوانی و کشت شلدر در این ناحیه بوده است. این کاهش pH ممکن است بر قابلیت جذب عناصر غذایی و عملکرد محصول تأثیر مثبت گذاشته باشد. در حالی که ظرفیت تبادل کاتیونی، رس، آهن و منگنز اختلاف معنی‌داری بین نواحی نشان ندادند، مقادیر هدایت الکتریکی، نیتروژن نیتراتی، فسفر، پتاسیم و روی قابل جذب در ناحیه سه به طور معنی‌داری بالاتر از نواحی یک و دو بود. همچنین ماده آلی و نیتروژن کل در نواحی دو و سه نسبت به ناحیه یک افزایش معنی‌داری داشتند. این افزایش عناصر غذایی در ناحیه سه احتمالاً ناشی از باقیمانده کودهای سال‌های گذشته، مدیریت متفاوت کودی و کشت ارقام پرمحصول بوده است. افزودن خاک‌های سیاه آب‌بندان در گذشته نیز ممکن است در افزایش هدایت الکتریکی و غنای عناصر غذایی در ناحیه سه نقش داشته باشد. با این حال، این شرایط ممکن است در بلندمدت به دلیل زهکشی نامناسب و عدم شستشوی املاح، منجر به افزایش شوری و تخریب تدریجی خاک شود. همچنین کیفیت آب چاه‌های منطقه نیز می‌تواند در افزایش شوری برخی مناطق مؤثر باشد که نیاز به بررسی بیشتر دارد.

جدول ۶. تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه از خصوصیات خاک برای سه ناحیه مدیریتی جدا شده در منطقه

متغیرها	ناحیه ۱ (n=۳۰)	ناحیه ۲ (n=۲۹)	ناحیه ۳ (n=۲۶)
pH	۷/۰±۴۲/۱۳ ^A	۷/۰±۳۷/۱۳ ^A	۷/۰±۲۸/۱۳ ^B
^۱ EC	۲/۰±۱۶/۷۹ ^B	۲/۰±۵۴/۸۴ ^B	۳/۰±۲۳/۸۱ ^A
^۲ OC	۱/۰±۷۵/۲۵ ^B	۲/۰±۱۳/۲۹ ^A	۲/۰±۲۴/۵۲ ^A
^۳ TN	۰/۰±۱۷۵۴/۰۲ ^B	۰/۰±۲۱۳۴/۰۳ ^A	۰/۰±۲۲۳۶/۰۵ ^A
^۴ N-NO ₃ ⁻¹	۱۱/۳±۹۷/۳۷ ^C	۱۵/۲±۴۴/۳۶ ^B	۲۰/۲±۲۰/۹۲ ^A
^۵ CEC	۳۰/۴±۳۳/۰۴ ^A	۳۳/۳±۰۸/۴۴ ^A	۳۳/۴±۵۸/۲۷ ^A
^۶ Clay	۳۶/۸±۱۳/۴۶ ^A	۳۷/۶±۶۹/۸۳ ^A	۳۶/۷±۰۰/۸۹ ^A
^۷ Av-P	۱۴/۷±۵۵/۴۹ ^B	۲۷/۱۱±۳۰/۰۱ ^B	۳۲/۱۰±۴۴/۱۹ ^A
^۸ Av-K	۱۹۳/۴۲±۰۲/۷۹ ^C	۲۵۵/۱۷±۴۰/۳۴ ^B	۳۴۴/۴۰±۴۴/۳۹ ^A
^۹ Av-Fe	۷۱/۲۷±۵۹/۴۰ ^A	۸۶/۲۴±۸۴/۵۸ ^A	۷۰/۲۷±۲۸/۲۱ ^A
^{۱۰} Av-Mn	۳۷/۲۴±۳/۱۴ ^A	۴۰/۲۷±۹/۷۳ ^A	۴۶/۲۵±۰۸/۱۰ ^A
^{۱۱} Av-Zn	۱/۲۴±۳۳/۱۴ ^B	۱/۲۷±۷۵/۷۳ ^B	۲/۲۵±۸۵/۱۰ ^A
^{۱۲} Av-Cu	۵/۱±۲۶/۴ ^B	۶/۱±۲۳/۱ ^A	۵/۱±۸۹/۴۷ ^{AB}
عملکرد دانه (شلتوک) (kg/ha)	۵۴۲۶/۱۵۴± ^B (n=۵)	۲۰۵±۵۹۶۲ ^{AB} (n=۶)	۱۳۰±۶۳۲۵ ^A (n=۴)

^۱ هدایت الکتریکی (dS/m)؛ ^۲ کربن آلی (%); ^۳ نیتروژن کل (%); ^۴ نیتروژن نیتراتی (mg/kg); ^۵ ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol+/kg); ^۶ رس (%); ^۷ فسفر قابل جذب (mg/kg); ^۸ پتاسیم قابل جذب (mg/kg); ^۹ آهن قابل جذب (mg/kg); ^{۱۰} منگنز قابل جذب (mg/kg); ^{۱۱} روی قابل جذب (mg/kg) و ^{۱۲} مس قابل جذب (mg/kg). براساس آزمون LSD، میانگین‌های هر ستون مربوط به هر عامل که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند فاقد اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج مطالعه نشان داد توزیع عناصر غذایی در خاک‌های شالیزاری منطقه مورد مطالعه یکنواخت نبوده و این تغییرات بر عملکرد برنج تأثیر مستقیم داشته است. با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی، سه ناحیه مدیریتی بهینه شناسایی شد که کارایی این روش‌ها در تفکیک نواحی مدیریتی در اراضی به ظاهر یکنواخت به خوبی اثبات گردید.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ناحیه سه با دارا بودن مقادیر بالاتر هدایت الکتریکی، نیتروژن نیتراتی، فسفر، پتاسیم و روی قابل جذب، همچنین کربن آلی و نیتروژن کل، بالاترین عملکرد شلتوک (۶۳۲۵ کیلوگرم در هکتار) را در مقایسه با نواحی ۱ (۵۴۲۶ کیلوگرم) و ۲ (۵۹۶۲ کیلوگرم) تولید کرده است.

این یافته‌ها اهمیت مدیریت تغذیه‌ای ویژه مکانی را نشان می‌دهد که می‌تواند از طریق کاهش مصرف کود در نواحی با غنای عناصر غذایی، افزایش هدفمند کوددهی در نواحی با کمبود عناصر غذایی و همچنین بهینه‌سازی مصرف کودهای نیتروژنه، فسفره و پتاسیمی منجر به افزایش عملکرد، کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط زیست گردد.

پیشنهادات زیر در انجام تحقیقات آینده مهم به نظر می‌رسد:

استفاده از سنجش از نزدیک برای پهنه‌بندی خاک

تلفیق روش‌های زمین‌آمار با الگوریتم‌های پیشرفته خوشه‌بندی

در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر مانند ویژگی‌های فیزیکی اراضی می‌باشد. این رویکرد می‌تواند پایه‌ای برای مدیریت پایدار شالیزارهای

استان مازندران و سایر مناطق مشابه کشور باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره ۰۴-۱۳۹۴-۰۱ انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه به عمل آورند.

منابع

- ابراهیم زاده، گلناز؛ یغمائیان مهابادی، نفیسه؛ بیات، حسین و متین فر، حمید رضا. (۱۴۰۲). کاربرد شاخص‌های توپوگرافی و طیفی در تعیین نواحی مدیریتی در مزارع کشت گندم دیم، قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۷)، ۱۰۰۵-۱۰۲۶.
- اولیایی، حمیدرضا؛ صالحی، علیرضا و زارعیان، غلامرضا. (۱۴۰۳). ارزیابی روش‌های زمین‌آمار برای پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان با کاربری‌های مختلف، استان فارس. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵(۱)، ۹۷-۱۱۶.
- ایوبی، مژگان؛ سکوتی، رضا و ملکوتی، محمد جعفر. (۱۳۹۵). بررسی و پیش‌بینی تغییرات مکانی ماده آلی و عناصر فسفر و پتاسیم خاک، مطالعه موردی: دشت شمالی ارومیه. *علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۰(۷۶)، ۱۷۷-۱۷۸.
- خزائی، الهه؛ بستانی، عبدالامیر و دواتگر، ناصر. (۱۳۹۶). تغییرات مکانی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در اراضی شرکت کشت و صنعت شریف آباد قزوین. *پژوهش‌های خاک*، ۳۱(۲)، ۲۱۳-۱۹۵.

REFERENCES

- Aggag, A. M., & Alharbi, A. (2022). Spatial analysis of soil properties and site-specific management zone delineation for the South Hail region, Saudi Arabia. *Sustainability*, 14(23), 16209.
- Agyeman, P. C., Khosravi, V., Michael Kebonye, N., John, K., Borůvka, L., & Vašát, R. (2022). Using spectral indices and terrain attribute datasets and their combination in the prediction of cadmium content in agricultural soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107077.
- Aliyu, K. T., Y. Kamara, A., M. Jibrin, J., E. Huising, J., M. Shehu, B., Adewopo, J. B., ... & M. Samndi, A. (2020). Delineation of soil fertility management zones for site-specific nutrient management in the maize belt region of Nigeria. *Sustainability*, 12(21), 9010.
- Ayoubi, M., Sokouti, R., & Malakouti, M. J. (2016). Study and prediction of the spatial variation of soil organic matter, phosphorus and potassium, case study: North part of of Urmia Plain [Research]. *Journal of Water and Soil Science*, 20(76), 177-187. (In Persian).
- Bangroo, S. A., Sofi, J. A., Bhat, M. I., Mir, S. A., Mubarak, T., & Bashir, O. (2021). Quantifying spatial variability of soil properties in apple orchards of Kashmir, India, using geospatial techniques. *Arabian*

- Journal of Geosciences*, 14(19), 2047.
- Barman, A., Sheoran, P., Yadav, R. K., Abhishek, R., Sharma, R., Prajapat, K., Singh, R. K., & Kumar, S. (2021). Soil spatial variability characterization: Delineating index-based management zones in salt-affected agroecosystem of India. *Journal of Environmental Management*, 296, 113243.
- Barrena-González, J., Lavado Contador, J. F., & Pulido Fernández, M. (2022). Mapping soil properties at a regional scale: Assessing deterministic vs. geostatistical interpolation methods at different soil depths. *Sustainability*, 14(16), 10049.
- Bhagwan, V. P. V., Theerthala, A. A., Devi, U. D. M. U., Neelima, T. L. T. L., & Chary, D. S. (2023). Delineation and evaluation of management zones for site specific nutrient management in maize tracts of Northern Telangana using geostatistical and fuzzy c mean cluster approach. 27 June 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square.
- Bottega, E. L., Marin, C. K., Oliveira, Z. B. D., Lamb, C. D. C., & Amado, T. J. C. (2023). Soil density characterization in management zones based on apparent soil electrical conductivity in two field systems: Rainfed and center-pivot irrigation. *AgriEngineering*, 5(1), 460-472.
- Bottega, E. L., Safanelli, J. L., Zeraatpisheh, M., Amado, T. J. C., Queiroz, D. M. d., & Oliveira, Z. B. d. (2022). Site-Specific Management Zones Delineation Based on Apparent Soil Electrical Conductivity in Two Contrasting Fields of Southern Brazil. *Agronomy*, 12(6), 1390.
- Bremner, J.M., & Mulvaney, R.G. (1982). Nitrogen total. Pp. 575-624. In: Page, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R. (eds.) *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison. WI.
- Breunig, F. M., Galvão, L. S., Dalagnol, R., Dauve, C. E., Parraga, A., Santi, A. L., Della Flora, D. P., & Chen, S. (2020). Delineation of management zones in agricultural fields using cover-crop biomass estimates from PlanetScope data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 102004.
- Brunelle, T., Chakir, R., Carpentier, A., Dorin, B., Goll, D., Guilpart, N., Maggi, F., Makowski, D., Nesme, T., Roosen, J., & Tang, F. H. M. (2024). Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 369.
- Cammarano, D., Zha, H., Wilson, L., Li, Y., Batchelor, W. D., & Miao, Y. (2020). A remote sensing-based approach to management zone delineation in small scale farming systems. *Agronomy*, 10(11), 1767.
- Chaudhry, M., Shafi, I., Mahnoor, M., Vargas, D., Thompson, E., & Ashraf, I. (2023). A systematic literature review on identifying patterns using unsupervised clustering algorithms: A data mining perspective. *Symmetry*, 15, 1679.
- Davatgar, N., Neishabouri, M. R., & Sepaskhah, A. R. (2012). Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. *Geoderma*, 173, 111-118.
- Dettori, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D., & Duce, P. (2011). Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy. *Field Crops Research*, 120(1), 179-188.
- Ebrahimzadeh, G., Yaghmaeian Mahabadi, N., Bayat, H., & Matinfar, H. R. (2023). Using topographical and spectral indices to delineate management zone in drylands wheat cultivated area, Qazvin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(7), 1005-1026. (In Persian).
- Filintas, A., Gougoulas, N., Kourgialas, N., & Hatzichristou, E. (2023). management zones delineation, correct and incorrect application analysis in a coriander field using precision agriculture, soil chemical, granular and hydraulic analyses, fuzzy k-means zoning, factor analysis and geostatistics. *Water*, 15(18), 3278.
- Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., & Fraisse, C. W. (2004). Management zone analyst (MZA) software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96(1), 100-108.
- Fu, Q., Wang, Z., & Jiang, Q. (2010). Delineating soil nutrient management zones based on fuzzy clustering optimized by PSO. *Mathematical and computer modelling*, 51(11-12), 1299-1305.
- Gee, G.W., & Buaider, J. (1982). Particle Size Analysis. Pp. 384-412, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R. (eds.) *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison. WI.
- Getahun, S., Kefale, H., & Gelaye, Y. (2024). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, 2024(1), 2126734.
- Huguet, F., Plà-Aragónés, L. M., Albornoz, V. M., & Pohl, M. (2025). A genetic algorithm for site-specific management zone delineation. *Mathematics*, 13(7), 1064.



- Ichami, S. M., Shepherd, K. D., Hoffland, E., Karuku, G. N., & Stoorvogel, J. J. (2020). Soil spatial variation to guide the development of fertilizer use recommendations for smallholder farms in western Kenya. *Geoderma regional*, 22, e00300.
- Inman, D., Khosla, R., Reich, R., & Westfall, D. G. (2008). Normalized difference vegetation index and soil color-based management zones in irrigated maize. *Agronomy journal*, 100(1), 60-66.
- Inman, D., Khosla, R., Reich, R., & Westfall, D. G. (2008). Normalized Difference Vegetation Index and Soil Color-Based Management Zones in Irrigated Maize. *Agronomy Journal*, 100(1), 60-66.
- Islam, S. (2025). Agriculture, food security, and sustainability: a review. *Exploration of Foods and Foodomics*, 3, 101082.
- Jena, R. K., Moharana, P. C., Pradhan, U. K., Sharma, G. K., Ray, P., Roy, P. D., & Ghosh, D. (2024). Soil fertility mapping and applications for site-specific nutrient management: a case study. In *Remote Sensing of Soils* (pp. 65-80). Elsevier.
- Khan, H., Esau, T. J., Farooque, A. A., Zaman, Q. U., Abbas, F., & Schumann, A. W. (2023). Chapter 2 - Soil spatial variability and its management with precision agriculture. In Q. Zaman (Ed.), *Precision Agriculture* (pp. 19-36). Academic Press.
- Khazaie, E., Bostani, A. A., & Davatgar, N. (2017). Geostatic and GIS evaluation of spatial variability of nitrogen, phosphorus, potassium, and cation exchange capacity in agro-industrial land of Sharif Abad in Qazvin. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(2), 195-213. (In Persian).
- Kyaw, T., Ferguson, R. B., Adamchuk, V. I., Marx, D. B., Tarkalson, D. D., & McCallister, D. L. (2008). Delineating site-specific management zones for pH-induced iron chlorosis. *Precision Agriculture*, 9, 71-84.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Liu, W., Lu, F., Chen, G., Xu, X., & Yu, H. (2021). Site-specific management zones based on geostatistical and fuzzy clustering approach in a coastal reclaimed area of abandoned salt pan. *Chilean journal of agricultural research*, 81(3), 420-433.
- Ma, B., Karimi, M. S., Mohammed, K. S., Shahzadi, I., & Dai, J. (2024). Nexus between climate change, agricultural output, fertilizer use, agriculture soil emissions: Novel implications in the context of environmental management. *Journal of cleaner production*, 450, 141801.
- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Arnó, J. (2018). Use of farmer knowledge in the delineation of potential management zones in precision agriculture: A case study in maize (*Zea mays* L.). *Agriculture*, 8(6), 84.
- Metwally, M. S., Shaddad, S. M., Liu, M., Yao, R.-J., Abdo, A. I., Li, P., Jiao, J., & Chen, X. (2019). Soil properties spatial variability and delineation of site-specific management zones based on soil fertility using fuzzy clustering in a hilly field in Jianyang, Sichuan, China. *Sustainability*, 11(24), 7084.
- Moharana, P. C., Jena, R. K., Pradhan, U. K., Nogiya, M., Tailor, B. L., Singh, R. S., & Singh, S. K. (2020). Geostatistical and fuzzy clustering approach for delineation of site-specific management zones and yield-limiting factors in irrigated hot arid environment of India. *Precision Agriculture*, 21, 426-448.
- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539-579. In: Page, A. L., Miller, R.H. Keeney, D.R. (eds). *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2th ed. ASA. SSSA. Madison. WI.
- Nogueira Martins, R., Magalhaes Valente, D. S., Fim Rosas, J. T., Souza Santos, F., Lima Dos Santos, F. F., Nascimento, M., & Campana Nascimento, A. C. (2020). Site-Specific nutrient management zones in soybean field using multivariate analysis: An approach based on variable rate fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(5), 687-700.
- Odeh, I. O. A., McBratney, A. B., & Chittleborough, D. J. (1992). Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Application to classification and soil-landform interrelationships. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 505-516.
- Ohana-Levi, N., Bahat, I., Peeters, A., Shtein, A., Netzer, Y., Cohen, Y., & Ben-Gal, A. (2019). A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 719-731.
- Oldoni, H., Terra, V. S. S., Timm, L. C., Júnior, C. R., & Monteiro, A. B. (2019). Delineation of management zones in a peach orchard using multivariate and geostatistical analyses. *Soil and Tillage Research*, 191, 1-10.
- Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. Pp. 403-430. In: Page et al., (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Monograph no 9. American Society of Agronomy. Madison. WI.

- Ortega, R. A., & Santibanez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in agriculture*, 58(1), 49-59.
- Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Chaali, N., Amaya, Y. M. Q., Carvajal, J. E. C., & Ramos, O. M. (2022). Towards site specific management zones delineation in rotational cropping system: Application of multivariate spatial clustering model based on soil properties. *Geoderma Regional*, 30, e00564.
- Owliaie, H., Salehi, A. & Zareian, G. (2024). Assessment of geostatistical models for zoning spatial distribution of some soil properties in Darengan region with different land uses, Fars province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(1), 97-116. (In Persian).
- Peralta, N. R., & Costa, J. L. (2013). Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and electronics in agriculture*, 99, 218-226.
- Raj, A., Singh, S. P., Singh, V. P., Pratap, T., Bhattacharya, P., & Dey, P. (2024). Combining Site-Specific Nutrient Allocation Tools Can Decrease Input Demands in No-Till Wheat Farming. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56(1), 90-107.
- Reyniers, M., Maertens, K., Vrindts, E., & De Baerdemaeker, J. (2006). Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. *Soil and Tillage Research*, 88(1-2), 262-273.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of. *Saline and Alkali Soils. Handbook*, 60, 129-134.
- Schenatto, K., Souza, E. G. d., Bazzi, C. L., Betzek, N. M., Gavioli, A., & Beneduzzi, H. M. (2017). Use of the farmer's experience variable in the generation of management zones. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(4Supl1), 2305-2322.
- Serrano, J., Shahidian, S., Paixão, L., Marques da Silva, J., & Moral, F. (2022). Management zones in pastures based on soil apparent electrical conductivity and altitude: NDVI, soil and biomass sampling validation. *Agronomy*, 12(4), 778.
- Shahinzadeh, N., Babaeinejad, T., Mohsenifar, K., & Ghanavati, N. (2022). Spatial variability of soil properties determined by the interpolation methods in the agricultural lands. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4897-4907.
- Shashikumar, B. N., Kumar, S., George, K. J., & Singh, A. K. (2023). Soil variability mapping and delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a Mid-Himalayan Watershed, India. *Environment, Development and Sustainability*, 25(8), 8539-8559.
- Shukla, A. K., Behera, S. K., Kumar, P., Mishra, R., Shukla, V., Pachauri, S. P., Sikaniya, Y., Srivastava, P. C., Sikarwar, A., Kumar, D., & Datta, S. P. (2025). Delineation of Management Zones for Site-Specific Soil Nutrient Management for Sustainable Crop Production. *Land Degradation & Development*, 36(1), 231-248.
- Srinivasan, R., Shashikumar, B. N., & Singh, S. K. (2022). Mapping of soil nutrient variability and delineating site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in eastern coastal region, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(3), 533-547.
- Vasu, D., Sahu, N., Tiwary, P., & Chandran, P. (2021). Modelling the spatial variability of soil micronutrients for site specific nutrient management in a semi-arid tropical environment. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(3), 1797-1812.
- Vendrell, P. F., & Zupancic, J. (1990). Determination of soil nitrate by transnitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21(13-16), 1705-1713.
- Westerman, R. L. (1991). Soil Testing and Plant Analysis, Third Edition. *Soil Science*, 152(2).
- Zeraatpisheh, M., Bakhshandeh, E., Emadi, M., Li, T., & Xu, M. (2020). Integration of PCA and fuzzy clustering for delineation of soil management zones and cost-efficiency analysis in a citrus plantation. *Sustainability*, 12(14), 5809.