

(OPEN ACCESS)

**Delineation of soil management zone using geostatistical
and fuzzy approaches based on soil properties and wheat yield
(a case study in Dashte-Naz, Sari)**

**Sahar Masoudi¹, Seyed Mostafa Emadi^{*2}, Mohammad Ali Bahmanyar³,
Fardin Sadegh-Zadeh⁴**

1. M.Sc. Graduate of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: sahar1368@mihamail.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mostafaemadi@gmail.com; mostafa.emadi@sanru.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mali.bahmanyar@gmail.com
4. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: fardin.upm@gmail.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 04.29.2025

Revised: 08.16.2025

Accepted: 08.30.2025

Keywords:

Available potassium,
Geostatistics,
Kriging,
Management zones,
Soil organic carbon

ABSTRACT

Background and Objectives: Efficient, cost-effective methods for managing agricultural fields are needed to maximize economic benefits and minimize environmental impacts. Fertilizer recommendations in Iran are mostly applied uniformly across fields, leading to over-application in nutrient-rich zones and under-application in nutrient-deficient zones. This necessitates efficient techniques for accurately measuring spatial variations in soil properties and identifying homogeneous management zones to optimize fertilizer application.

Materials and Methods: To delineate the soil management zone and evaluate the spatial variability of soil properties, a 44.5 ha field in the Dashte-Naz area of Sari city, Iran, was selected using the integration of geostatistics, principal component analysis (PCA), and a fuzzy clustering algorithm. The 108 soil samples were collected from a 60 m × 60 m grid at a depth of 0-30 cm. Soil properties, including pH, EC, organic carbon, soil N-nitrate, phosphorus, potassium, cation exchange capacity, and wheat yield, were determined. Spatial variability of soil properties was assessed by geostatistical analysis. To estimate soil properties at unsampled locations, the kriging and inverse distance weighting (IDW) interpolation methods (powers of 1, 2, and 3) were used. The statistical indicators of RMSE and ME were used to select the best interpolation method.

Results: The best interpolation methods for pH, EC, and organic carbon were IDW with powers of 2 and 1, and kriging, respectively. The best interpolation method for CEC was IDW with a power of 1, whereas the kriging method performed best for other soil properties. The map of soil properties with a 15 m interval was prepared using the best-identified interpolation methods in the field. The PCA was performed on all

interpolated points, and the fuzzy clustering algorithm in MZA software was then used to identify homogeneous management zones. The fuzziness performance index (FPI) and normalized classification entropy (NEC) were used to determine the optimal number of clusters. The study area was divided into three management zones: 20.5 hectares in Zone 1, 14.9 hectares in Zone 2, and 9.02 hectares in Zone 3. Additionally, Zone 3 exhibited better fertility and crop performance quality. In contrast, Zones 1 and 2, due to their lower fertility levels, required higher fertilizer application to achieve optimal productivity.

Conclusion: The overall results indicated that the optimal number of management zones for the study area was three. Analysis of variance (ANOVA) revealed significant heterogeneity in soil fertility properties. Therefore, when these results are applied to the target crop according to the management zones, they can prevent uniform fertilizer application. This approach not only optimizes agricultural costs, but also prevents soil resource degradation and maximizes crop production.

Cite this article: Masoudi, Sahar, Emadi, Seyed Mostafa, Bahmanyar, Mohammad Ali, Sadegh-Zadeh, Fardin. 2026. Delineation of soil management zone using geostatistical and fuzzy approaches based on soil properties and wheat yield (a case study in Dashte-Naz, Sari). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 16 (1), 93-111.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23599.2192

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



استفاده از روش‌های زمین‌آماري و فازی در تعیین نواحی مدیریتی بر اساس خصوصیات خاک و عملکرد گندم (مطالعه موردی در منطقه دشت ناز ساری)

سحر مسعودی^۱، سید مصطفی عمادی^{۲*}، محمدعلی بهمنیار^۳، فردین صادق‌زاده^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: sahar1368@mihanmail.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: mostafaemadi@gmail.com; mostafa.emadi@sanru.ac.ir
۳. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: mali.bahmanyar@gmail.com
۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: fardin.upm@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸	سابقه و هدف: در حال حاضر، روش‌های کارآمد و مقرون به‌صرفه برای مدیریت مزارع به‌منظور به‌حداکثر رساندن بازده اقتصادی و به‌حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی، مورد نیاز است. توصیه کودی در حال حاضر برای مزارع تقریباً در ایران برای مناطق بزرگ معمولاً یکنواخت انجام می‌شود. بنابراین مدیریت یکنواخت اراضی اغلب منجر به کاربرد بیش از حد کود در مناطق با سطح عناصر غذایی بالا و کم‌تراز حد لازم در مناطق با سطح عناصر غذایی کم می‌شود. از این‌رو باید روش‌های کارآمد برای اندازه‌گیری دقیق تغییرات ویژگی‌های خاک درون مزرعه و تعیین نواحی مدیریتی همگن برای کاربرد متعادل کودها اجرا شوند.
واژه‌های کلیدی: پتاسیم قابل‌استفاده، زمین‌آمار، کربن آلی خاک، کریجینگ، نواحی مدیریتی	مواد و روش‌ها: به‌منظور شناسایی و ارزیابی تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک و تعیین مرز نواحی مدیریتی با استفاده ترکیبی از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی، پژوهشی در منطقه‌ای به وسعت ۴۴/۵ هکتار در منطقه دشت ناز ساری صورت پذیرفت. نمونه‌برداری خاک به‌صورت شبکه‌ای منظم به ابعاد ۶۰×۶۰ متر به تعداد ۱۰۸ نمونه از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک تهیه گردید. مقادیر pH، EC، کربن آلی، بافت خاک، نیتروژن نیتراتی، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و عملکرد گیاه گندم تعیین و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک با روش‌های زمین‌آماري

انجام گرفت. به منظور تخمین نقاط در محل‌های نمونه‌برداری نشده از روش‌های کریجینگ و روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) با توان‌های ۱، ۲ و ۳ استفاده شد و با محاسبه شاخص آماری RMSE و ME بهترین روش انتخاب شد.

یافته‌ها: بهترین روش درون‌یابی برای pH، EC، درصد ذرات رس و کربن آلی به ترتیب، IDW با توان ۲، IDW با توان ۱، کریجینگ، IDW با توان ۳ به دست آمد. بهترین روش درون‌یابی برای پارامترهای CEC، نیتروژن، فسفر، پتاسیم قابل استفاده و عملکرد به ترتیب، IDW با توان ۱ و برای بقیه پارامترها روش کریجینگ انتخاب گردید. نقشه تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماري ترسیم شد. سپس تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی برای مشخص کردن ناحیه مدیریتی صورت پذیرفت. بر این اساس شاخص عملکرد فازی (FPI) و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده (NEC) برای تعیین تعداد خوشه بهینه مورد استفاده قرار گرفت. سه ناحیه مدیریتی جدا و مرزبندی شد که ۲۰/۵ هکتار از اراضی مورد مطالعه در ناحیه ۱، ۱۴/۹ هکتار در ناحیه ۲ و ۹/۰۲ هکتار در ناحیه ۳ قرار گرفتند. همچنین ناحیه ۳ از نظر حاصلخیزی و کیفیت عملکرد در شرایط بهتری قرار داشت. برعکس در نواحی مدیریتی ۱ و ۲، به خاطر پایین بودن سطح حاصلخیزی کاربرد بیش‌تر کود توصیه شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که تعداد بهینه ناحیه مدیریتی برای این منطقه ۳ بود و روش استفاده شده برای جداسازی مرز خاک‌های همگن به خوبی توانسته است خاک‌های مشابه را از لحاظ حاصلخیزی از یکدیگر جدا کند. تجزیه و تحلیل واریانس، ناهمگونی در خصوصیات حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول در ناحیه‌های جدا شده را به صورت معنی‌داری نشان داد. بنابراین می‌تواند از کاربرد یکنواخت کود به نحو مؤثری جلوگیری کند. این رویکرد نه تنها هزینه‌های کشاورزی را بهینه می‌سازد، بلکه از تخریب منابع خاک نیز جلوگیری کرده و تولید محصول را به حداکثر می‌رساند.

استناد: مسعودی، سحر، عمادی، سید مصطفی، بهمنیار، محمدعلی، صادق‌زاده، فردین (۱۴۰۵). استفاده از روش‌های زمین‌آماري و فازی در تعیین نواحی مدیریتی بر اساس خصوصیات خاک و عملکرد گندم (مطالعه موردی در منطقه دشت ناز ساری). نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۶ (۱)، ۹۳-۱۱۱.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23599.2192



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

یکی از دلایل اساسی بازده پایین عملکرد محصول، عدم مدیریت حاصلخیزی خاک و پایداری عناصر غذایی است (۱). مدیریت ویژه مکانی^۱ عناصر غذایی، از طریق مصرف متغیر کود، به عنوان یکی از ابزارهای مهم در حل این مشکل شناخته شده است و برای دستیابی به کشاورزی پایدار به عنوان یک رویکرد مهم در نظر گرفته می‌شود (۲، ۳). مدیریت ویژه مکانی به دنبال شناسایی، تجزیه و تحلیل و مدیریت تغییرپذیری مکانی و زمانی در زمین به منظور بهینه‌سازی سوددهی، پایداری و حفاظت از محیط زیست است (۴). متداول‌ترین روش برای مدیریت تغییرپذیری مکانی در مزارع استفاده از ناحیه‌ها یا نواحی مدیریتی^۲ است. تعیین نواحی یا ناحیه‌بندی کردن یک مزرعه به ظاهر یکنواخت، اساس کار مدیریت ویژه مکانی است. یک روش مقرون به صرفه برای بهبود مدیریت زراعی در مزرعه استفاده از ناحیه‌ها یا نواحی مدیریتی است که یک مزرعه، به ظاهر یکنواخت را به مناطقی با خصوصیات مشابه تقسیم کرده و در این اراضی جدا شده، نهاده‌های مختلف زراعی براساس پتانسیل خاک و وضعیت عناصر غذایی برای هر ناحیه مدیریت شوند (۵). مطالعات متعددی برای تعیین نواحی مدیریتی اکوسیستم‌های کشاورزی مختلف با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی فازی انجام شده است (۶، ۷، ۸). به عنوان مثال جانا و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی فازی سه ناحیه مدیریتی را برای بخشی از اراضی هند تعیین کردند. آنان هم‌چنین عنوان کردند که استفاده از این روش‌ها تغییرپذیری را در منطقه کاهش داده و ابزاری مؤثر و کارآمد برای انواع

مداخلات به منظور اهداف کشاورزی ارائه می‌دهد (۹). هم‌چنین زراعت‌پیشه و همکاران (۲۰۲۰) برای تعیین نواحی مدیریتی برای باغات مرکبات در شمال ایران از ترکیب خوشه‌بندی فازی و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده کردند. آنان شش ناحیه مدیریتی شناسایی کردند که به ترتیب بالاترین کیفیت خصوصیات خاک در ناحیه ۵، ۲، ۶، ۱، ۳ و ۴ وجود داشت (۱۰). در پژوهش دیگر ابراهیم‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) با کاربرد تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی فازی بر اساس دو شاخص عملکرد فازی (FPI) و آنتروپی طبقه‌بندی نرمال‌شده (NCE) شش ناحیه مدیریتی در مزارع کشت گندم دیم در قزوین شناسایی کردند (۱۱).

به‌طورکلی اطلاعات کمی در مورد تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک در اراضی دشت ناز ساری در استان مازندران وجود دارد. به‌علاوه کوددهی در این مناطق به‌صورت یکنواخت و بدون در نظر گرفتن مقادیر آن عناصر در خاک سبب پیامدهای زیست‌محیطی نظیر نشست آلاینده‌ها (به‌ویژه نیترات) به آب‌های زیرزمینی شده است. بنابراین به‌منظور جلوگیری از تخریب خاک و آلودگی آب و هم‌چنین کاهش قابل‌توجه هزینه‌ها، این پژوهش شناسایی تغییرپذیری مکانی عوامل حاصلخیزی خاک برای گندم و سپس تعیین نواحی مختلف مدیریتی مؤثر در کشت گندم با استفاده ترکیبی از روش زمین‌آماری و الگوریتم خوشه‌بندی فازی را انجام داده است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور شناسایی و ارزیابی تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک در منطقه دشت ناز ساری در استان مازندران، زمینی در ۲۹ کیلومتری شمال شرق ساری در ۵۳ درجه و ۱۱ دقیقه و ۴۵ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۱۲ دقیقه و ۲۹ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۹

1- Site-specific management

2- Management zone

دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۴۴ ثانیه عرض شمالی انتخاب شد (شکل ۱). این منطقه دارای مساحت تقریبی ۴۴/۵ هکتار و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۵/۵ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی ۷۹۸ میلی‌متر و رژیم رطوبتی و حرارتی به‌ترتیب زیریک و ترمیک بود. خاک منطقه مورد مطالعه در سیستم طبقه‌بندی آمریکایی بر اساس کلید تاکسونومی خاک (نسخه ۱۳) در تحت گروه Typic Haploxerepts طبقه‌بندی می‌شود (۱۲). جمع‌آوری نمونه خاک (در فواصل منظم هر ۶۰×۶۰ متر) از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری و محل نمونه‌برداری نیز با GPS ثبت شد و تعداد نمونه‌برداری نیز ۱۰۸ نقطه بود. نمونه‌ها پس از هوا خشک‌شدن و عبور از الک دو میلی‌متری برای انجام آزمایش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند. pH در گل اشباع (۱۳)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک (۱۳)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۴)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (۱۵)، نیتروژن نیتراتی به روش رنگ‌سنجی (اسپکتروفتومتری) (۱۶)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (۱۷)، پتاسیم قابل استفاده توسط روش استات آمونیوم (۱۸)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استخراج با استات سدیم (۱۹) اندازه‌گیری شد. آماره‌های توصیفی شامل حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، واریانس، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS ۱۸ و نرم‌افزار Develve محاسبه شدند. جهت بررسی آزمون نرمال بودن متغیرها، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد و داده‌هایی که از توزیع نرمال برخوردار نبودند، با لگاریتم‌گیری و یا به روش باکس-کاکس نرمال شدند. تجزیه و تحلیل ساختار تغییرات مکانی با استفاده از تغییرنما انجام گرفت. الگوی تغییرات مکانی و درجه پیوستگی مکانی متغیرها با استفاده از تابع نیم تغییرنمای تجربی

$\gamma(h)$ محاسبه گردید و از نرم‌افزار GS^+ (۵/۱) (VERSION) برای رسم تغییرنماها استفاده گردید. سپس مدل‌های نیم تغییرنما مانند کروی، نمایی، گوسی و خطی بر نیم تغییرنمای تجربی برازش داده شد. ارزیابی بهترین مدل برازش داده شده بر نیم تغییرنما با استفاده از ضریب تبیین (R^2) و مجموع مربعات باقی‌مانده $^1(RSS)$ انجام شد (۲۰). به‌منظور برآورد مقادیر متغیرهای خاک در نقاط نمونه‌برداری نشده در فواصل ۱۰×۱۰ متر، از روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده گردید. برای مقایسه روش‌های مختلف میان‌یابی به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری، ۲۲ نقطه از ۱۰۸ نقطه نمونه‌برداری شده به‌صورت تصادفی انتخاب گردید.

بعد از به‌دست 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 تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و مؤلفه‌هایی که مقدار ویژه آن‌ها از عدد یک بیش‌تر بود، انتخاب شدند. خوشه‌بندی از ابزارهای متداول داده‌کاوی است که با استفاده از معیارهای اندازه‌گیری فاصله، داده‌ها را به دسته‌هایی با حداکثر شباهت درون‌گروهی و حداقل شباهت بین‌گروهی 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. خوشه‌بندی طبقه‌بندی c-means فازی با استفاده از نرم‌افزار MZA یا تحلیل‌گر ناحیه مدیریتی انجام شد. توان فازی‌شدن در مقدار متداول خود یعنی ۱/۳۵ و طبقه‌بندی برای دامنه‌ای از کلاس‌های ۲ تا ۶ تکرار شد (۸). سپس

۱ تغییر می‌کند. مقدار صفر نشان‌دهنده کلاس‌های مجزا با عضو کم‌اشتراکی و یک نشان‌دهنده عدم وجود کلاس مجزا با درجه زیادی اشتراک عضو می‌باشد. NCE برآوردی از مقدار بهم‌ریختگی ایجاد شده توسط تعداد مشخصی از کلاس‌ها می‌باشد. تعداد بهینه خوشه برای هر دو شاخص، زمانی به دست می‌آید که هر دو شاخص در حداقل مقدار خود باشند. در این حالت حداقل اشتراک عضو (FPI) و حداکثر مقدار سازماندهی عضو (NCE) در نتیجه فرایند خوشه‌بندی به دست آمده است (۶ و ۸). بعد از جداسازی ناحیه‌های مختلف مدیریتی، تجزیه و تحلیل واریانس یک‌طرفه متغیرهای قرار گرفته در هر ناحیه انجام شدند و در انتها، نقشه ناحیه‌های مدیریتی از منطقه مورد مطالعه توسط نرم‌افزار ILWIS3.3 ترسیم شد.

مقدار شاخص کارآمدی فازی‌شدن یا FPI و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده یا NCE که در زیر معادلات آن‌ها آمده است، خوشه‌ها یا دسته‌های جدا شده در منطقه به دست آمد (۶) و انتخاب تعداد زون‌های مدیریتی با کم‌ترین آماره‌های ذکر شده انجام شد:

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

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

در این معادلات، c تعداد خوشه، n تعداد مشاهدات، μ_{ik} عضو فازی و $\log_a$ الگوریتم طبیعی می‌باشد. FPI درجه فازی شدن ایجاد شده از تعداد مشخص کلاس‌ها را محاسبه می‌کند. مقدار FPI در دامنه ۰ تا



شکل ۱- محل نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Soil sampling points in the study area.

نتایج و بحث

جدول ۱ متغیرهای آماری خصوصیات خاک را نشان می‌دهد که شامل ضریب تغییرات، حداقل، حداکثر، میانگین ۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد از داده‌ها و میانگین کل داده‌ها می‌باشد. طبق جدول به‌دست آمده، کم‌ترین ضریب تغییرات مربوط به pH (۲/۵٪) و بیش‌ترین ضریب تغییرات مربوط به نیتروژن قابل‌استفاده (۸۸/۶۵٪) است. در طبقه‌بندی وایلدینگ (۱۹۸۳) متغیرهای خاکی، که دارای ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۵ درصد باشند دارای تغییرات کم، متغیرهایی با ضریب تغییرات بین ۱۵-۳۵ درصد دارای تغییرات متوسط و متغیرهایی با ضریب تغییرات

بیش‌تر از ۳۵ درصد دارای تغییرات زیاد می‌باشند (۲۱). ضریب تغییرات pH، کم‌تر از ۱۵ درصد می‌باشد و ضریب تغییرات EC، درصد ذرات رس، درصد کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، پتاسیم قابل‌استفاده و عملکرد، بین ۱۵-۳۵ درصد است. همچنین ضریب تغییرات نیتروژن نیتراتی و فسفر قابل‌استفاده بیش‌تر از ۳۵ درصد می‌باشد. داده‌های درصد ذرات رس، نیتروژن قابل‌استفاده، فسفر قابل‌استفاده از روش تبدیل لگاریتمی و داده‌های pH و ظرفیت تبادل کاتیونی از روش تبدیل باکس کاکس در محیط نرم‌افزاری Develve نرمال شدند.

جدول ۱- خلاصه آماری خصوصیات خاک.

Table 1. Summary Statistics of Soil Properties.

شاخص	حداقل	%5	%25	%50	%75	%95	میانگین	حداکثر	ضریب تغییرات
Index	Minimum						Mean	Maximum	Coefficient of Variation (%)
pH	6.6	7	7.3	7.4	7.5	7.5	7.5	7.8	2.5
EC (dS/m)	0.45	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	1.8	30.3
رس (%)	30	32	38.5	41.2	42.9	45.3	46.8	88.8	20.7
کربن آلی (%)	1.7	1.9	2.2	2.5	2.6	2.7	2.8	6.3	19.6
نیتروژن نیتراتی	0.2	0.5	1.8	2.9	4.3	5.8	6.9	37.9	88.6
N-NO ₃ (mg/kg)	7.1	9.7	20.7	26.3	28.9	30.6	31.1	44.3	24.7
ظرفیت تبادل کاتیونی	2.7	3.2	4.8	6.6	8.7	10.9	12.1	36.4	61.1
CEC (Cmol ⁺ /kg)	146.8	146.4	245.6	288.8	320.7	348.4	357.6	551.7	24.6
فسفر قابل‌استفاده	2.9	3.2	4.1	4.7	5.3	5.5	6.1	11.8	28.9
Available phosphorus (AP) (mg/kg)									
پتاسیم قابل‌استفاده									
Available Potassium (AK) (mg/kg)									
عملکرد									
Yield (tone/ha)									

همبستگی متغیرها: جدول ۲ ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر مورد مطالعه خاک را نشان می‌دهد. در این قسمت از داده‌های نرمال برای به‌دست آوردن همبستگی

بین فاکتورهای مورد مطالعه استفاده شده است. به‌طورکلی برای داده‌هایی با توزیع نرمال از ضریب همبستگی پیرسون و برای داده‌هایی با توزیع غیرنرمال

از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده می‌کنند. در منطقه مورد مطالعه، تقریباً تمام متغیرها به‌طور قابل توجهی همبسته شدند. طبق جدول ۳ نتایج نشان داد که عملکرد با pH و کربن آلی در سطح ۵ درصد و با EC، پتاسیم قابل استفاده و نیتروژن نیتراتی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود.

جدول ۲- ضریب همبستگی بین عملکرد و برخی خصوصیات خاک (تعداد=۱۰۸).

Table 2. Correlation Coefficient Between the yield and Some Soil Properties (N=108).

متغیرها Variables	عملکرد Yields	pH	EC (dS/m)	کربن آلی (%) OC (%)	رس (%) Clay (%)	فسفر قابل استفاده Available phosphorus	پتاسیم قابل استفاده Available Potassium	نیتروژن نیتراتی N-NO ₃	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (Cmol+/kg)
عملکرد Yields	1								
pH		1							
EC (dS/m)			1						
کربن آلی (%) OC (%)				1					
رس (%) Clay (%)					1				
فسفر قابل استفاده AP (mg/kg)						1			
پتاسیم قابل استفاده AK (mg/kg)							1		
نیتروژن نیتراتی N-NO ₃ (mg/kg)								1	
ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (Cmol+/kg)									1

*, ** و ns به ترتیب، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و معنی‌دار نبودن را نشان می‌دهد

*, ** and ns means significant at 1% and 5%, ns non-meaningful, respectively

برازش بهترین نیم‌تغییرنا برای خصوصیات خاک:

نیم‌تغییرنا برای توصیف ارتباط مکانی یک متغیر به‌کار می‌رود و کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری‌شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آن نشان می‌دهد (۲۲). بهترین مدل نیم‌تغییرنمای برازش‌شده بر متغیرها و مؤلفه‌های آن در جدول ۳ نشان داده است که براساس بیش‌ترین R^2 و کم‌ترین RSS بهترین مدل انتخاب می‌شود. تمامی متغیرهای مطالعه‌شده دارای اثر قطعه‌ای نسبتاً بالا

بودند، به‌جز pH و درصد ذرات رس که اثر قطعه‌ای آن‌ها نزدیک به صفر بود. این تغییرات می‌تواند به‌خاطر تغییرات تصادفی یا ذاتی و خطای نمونه‌برداری باشد. دامنه تأثیر برای EC کم‌ترین مقدار و برای نیتروژن نیتراتی بیش‌ترین مقدار را دارا است. عوامل ذاتی تشکیل‌دهنده خاک بیش‌ترین تأثیر را در مقدار دامنه تأثیر دارد (۲۰). به‌منظور تعیین شدت وابستگی مکانی متغیرهای خاک، از نسبت اثر قطعه‌ای به واریانس کل یا آستانه استفاده شد. چنان‌چه این نسبت کم‌تر از ۲۵ درصد گردد، نشان‌دهنده وابستگی

۲۶ هزار هکتاری از اراضی شالیزاری استان گیلان، نشان دادند که آن متغیرها از ساختار مکانی متوسط برخوردار است در این مطالعه برای همه متغیرها به جز pH، دارای اثر قطعه‌ای بزرگی بود (۲۶). اثر قطعه‌ای به علت وجود تغییرات در فواصل نمونه‌برداری و یا به دلیل خطای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری بروز می‌کند (۲۷). در مطالعه حاضر، برای اکثر متغیرها مدل نیم‌تغییرنما کروی انتخاب شد. باقرزاده و همکاران (۲۰۲۳) نیز به منظور ارزیابی پراکنش عناصر غذایی و بهینه‌سازی مصرف کود گندم برای کربن آلی خاک از مدل کروی استفاده کردند (۲۸). هم‌چنین طبق جدول ۳ برای متغیر فسفر قابل‌استفاده و عملکرد گندم، مدل نمایی به‌دست آمد. پیردشتی و همکاران (۲۰۱۸) برای ارزیابی تغییرپذیری مکانی برخی خصوصیات خاک شالیزارهای دشت فومنات برای EC، CEC و pH خاک از مدل نمایی بهره بردند (۲۹).

مکانی قوی و اگر این نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد قرار گیرد بیانگر وابستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگ‌تر از ۷۵ درصد باشد، نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود (۲۳). بر این اساس تمام متغیرهای مورد مطالعه، دارای وابستگی مکانی قوی بودند (جدول ۳). ساختار مکانی قوی نشان‌دهنده تحت‌تأثیر قرار گرفتن متغیر از عوامل ذاتی تشکیل‌دهنده خاک است. هم‌چنین ساختار مکانی ضعیف نشان‌دهنده تحت‌تأثیر قرار گرفتن متغیر از عامل‌های مدیریتی (مانند عملیات خاک‌ورزی و کوددهی) است (۲۴).

بابازاده و همکاران (۲۰۱۲) در ارزیابی تغییرات مکانی برخی از خصوصیات خاک دریافتند، تمام متغیرها اعم از، pH، EC، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، نیتروژن و فسفر خاک دارای وابستگی مکانی قوی بودند (۲۵). دواتگر و همکاران (۲۰۱۲) در ارزیابی تغییرات مکانی عناصر غذایی در وسعت

جدول ۳- پارامترهای نیم‌تغییرنمای متغیرهای مورد مطالعه.

Table 3. The Semi-variogram Parameters of the studied variables.

مجموع مربعات باقی‌مانده RSS	ضریب تبیین r^2	اثر قطعه‌ای نسبی (%) Relative Piece Effect (%)	دامنه تأثیر (متر) Effect Range (m)	اثر قطعه‌ای Detail Effect	مدل Model	متغیر Variable
5.270×10^{-49}	0.82	4.99	180	0.0001	کروی	pH
5.432×10^{-4}	0.47	4.48	112	0.0024	کروی	EC (dS/m)
5.666×10^{-5}	0.91	0.31	190	0.0001	کروی	رس (%) Clay (%)
8.142×10^{-3}	0.77	5.28	163	0.017	کروی	کربن آلی (%) OC (%)
1.35	0.88	0.24	1181	0.01	گوسی	نیتروژن- نیتراتی N-NO ₃ (mg/kg)
2.969×10^{-14}	0.51	12.36	128	100000	کروی	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol+/kg)
4.274×10^{-3}	0.68	11.66	141	0.042	نمایی	فسفر قابل‌استفاده AP (mg/kg)
3.209×10^6	0.91	25.22	418	2240	کروی	پتاسیم قابل‌استفاده AK (mg/kg)
0.313	0.94	18.31	531	0.685	نمایی	عملکرد (تن/هکتار) Yield(ton/ha)

تعيين بهترين روش تخمين براي خصوصيات خاک: طبق نتايج به‌دست آمده از جدول ۴ بهترين روش درون‌يابي براي pH، EC، درصد ذرات رس و کربن آلي به‌ترتيب، روش وزن‌دهي معکوس فاصله IDW با توان ۲، IDW با توان ۱، کريجينگ معمولي، IDW با توان ۳ به‌دست آمد. مقدار RMSE به‌دست آمده براي اين متغيرهاي pH، EC، درصد ذرات رس و کربن آلي به‌ترتيب، ۰/۰۹۹، ۰/۲۳، ۲/۹۰، ۰/۳۲ به‌دست آمد. مقدار RMSE به‌دست آمده از دو روش کريجينگ و وزن‌دهي معکوس فاصله تفاوت چنداني نداشت، که نشان‌دهنده اين موضوع است که زمين‌آمار مي‌تواند روش خوبي براي تخمين اين متغيرها در نقاط نمونه‌برداري نشده باشد. ايوبي و همکاران (۲۰۱۶) بهترين روش ارزيابي براي تخمين درصد کربن آلي در نقاط نمونه‌برداري نشده را روش کريجينگ پيشهاد کردند، زيرا از صحت بيش‌تري برخوردار بود (۳۰). طبق نتايج به‌دست آمده از جدول ۴ بهترين روش درون‌يابي براي پارامترهاي CEC، نيتروژن قابل‌استفاده، پتاسيم قابل‌استفاده و عملکرد به‌ترتيب، روش وزن‌دهي معکوس فاصله

(IDW) با توان ۱ و براي بقيه پارامترها روش کريجينگ انتخاب شد. مقدار RMSE به‌دست آمده از دو روش کريجينگ و وزن‌دهي معکوس فاصله تفاوت چنداني نداشت، که بيانگر اين نظر است که زمين‌آمار مي‌تواند روش خوبي براي تخمين اين متغيرها در نقاط نمونه‌برداري نشده باشد. مقدار RMSE به‌دست آمده براي متغيرهاي CEC، نيتروژن نيتراتي، فسفر قابل‌استفاده، پتاسيم قابل‌استفاده و عملکرد به‌ترتيب ۱/۷۵، ۰/۹۹، ۷/۲۶، ۴۸/۳۰، ۱/۳۹ به‌دست آمد. جلالی و همکاران (۲۰۱۳) بهترين روش ارزيابي براي تخمين فسفر قابل‌استفاده و پتاسيم قابل‌استفاده در نقاط نمونه‌برداري نشده را روش کريجينگ پيشهاد کردند، زيرا از صحت بيش‌تري برخوردار بود (۳۱). شاهين‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) روش کريجينگ معمولي را براي پتاسيم قابل‌استفاده، رس و pH پيشهاد کردند (۳۲). کارواريا و همکاران (۲۰۲۱) نيز در مطالعه‌اي در بخش شرقي ماديا پرادش هند عنوان کردند روش کريجينگ معمولي براي پتاسيم قابل‌استفاده، گوگرد و pH و روش IDW براي نيتروژن، کربن آلي و فسفر قابل‌استفاده خوب عمل کردند (۳۳).

جدول ۴- نتايج ارزيابي روش‌هاي کريجينگ و IDW پارامترهاي خاک.

Table 4. The cross-valuation results of Kriging and IDW interpolation methods for soil variables.

پارامترها	بهترين روش	خطاي ميانگين	جذر ميانگين مجذور مربعات خطا
Parameters	Best metod	ME	RMSE
pH	IDW با توان ۲	0.009251	0.099326
EC (dS/m)	IDW با توان ۱	0.0425	0.231686
رس (%)	کريجينگ معمولي	-1.01523	2.901742
کربن آلي (%)	IDW با توان ۳	-0.05952	0.325386
نيتروژن - نيتراتي	کريجينگ معمولي	-0.45144	0.992909
N-NO ₃ (mg/kg)	IDW با توان ۱	0.461201	1.756219
ظرفيت کاتيون تبديلي	کريجينگ معمولي	2.117722	7.265528
CEC (Cmol+/kg)	کريجينگ معمولي	-9.65131	48.30799
فسفر قابل‌استفاده	کريجينگ معمولي	0.346618	1.391265
AP (mg/kg)			
پتاسيم قابل‌استفاده			
AK (mg/kg)			
عملکرد			
Yield (ton/ha)			

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی: از آن‌جا که اکثر خواص با یکدیگر همبستگی داشتند (جدول ۲)، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی به‌منظور خلاصه نمودن تنوع در این خواص انجام شد. طبق جدول ۵ سه مؤلفه اصلی مقدار ارزش ویژه آن‌ها بالای یک بود. مؤلفه اصلی اول ۳۲٪ از کل واریانس تعیین شده بود و با pH، نیتروژن، فسفر، پتاسیم قابل‌استفاده و عملکرد تطابق دارد. مؤلفه اصلی دوم ۲۴٪ اضافی از واریانس کل را توضیح داد و با درصد کربن آلی تطابق دارد. مؤلفه اصلی سوم ۱۴٪ اضافی از واریانس کل بود، که با درصد ذرات رس و ظرفیت تبادل کاتیونی تطابق دارد. نتایج حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی پژوهش جیبانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز منجر به شناسایی سه مؤلفه شد. در آن مطالعه سه مؤلفه اصلی PC1، PC2، PC3 به‌ترتیب ۴۱/۹۹، ۱۹/۱۷، ۱۲/۷۳ درصد از واریانس کل بود. مؤلفه اصلی اول تحت‌تأثیر مواد آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک بود. مؤلفه اصلی دوم تحت‌تأثیر pH و ظرفیت تبادل کاتیونی، مؤلفه اصلی سوم نیز تحت‌تأثیر ذخیره کربن

آلی بود (۳۴). یوان و همکاران (۲۰۲۲) نیز ۳ مؤلفه اصلی را برای تعیین نواحی مدیریتی شناسایی کردند که ۷۸/۱۴ درصد از واریانس کل را توضیح دادند (۳۵). براساس پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۰۹) تعداد مؤلفه اصلی برای منطقه مورد مطالعه دو بود که مؤلفه اصلی اول با ۵۰ درصد از واریانس کل با مواد آلی، نیتروژن، پتاسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و مؤلفه اصلی دوم با ۲۱ درصد از واریانس کل با pH و فسفر خاک تطابق داشتند (۳۶). شاشیکومار و همکاران (۲۰۲۲) نیز پنج مؤلفه اصلی که مقادیر ویژه آن از یک بیش‌تر بودند و ۶۹/۴۸ درصد واریانس کل را شامل شدند، شناسایی کردند. مؤلفه‌های اصلی PC2، PC1، PC3، PC4 و PC5 به‌ترتیب ۲۰/۴۴، ۱۷/۱۹، ۱۳/۲۲، ۹/۵۹ و ۹/۰۴ درصد از واریانس را شامل شدند. هم‌چنین نتایج آنان نشان داد PC1 تحت‌تأثیر EC، pH و رس، PC2 تحت‌تأثیر فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده، شیب و پایداری خاک سطحی، PC3 تحت‌تأثیر نیتروژن کل و کربن کل، PC4 تحت‌تأثیر ارتفاع و PC5 تحت‌تأثیر شاخص رطوبت زمین بودند (۳۷).

جدول ۵- تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی برای خصوصیات خاک و ضرایب بارگذاری متغیرها برای سه مؤلفه اول.

Table 5. Principal component analysis for soil properties and the loading factors of variables for the first three components.

مؤلفه Component	ارزش ویژه Special value	واریانس توجیه‌شده % Justified variance%	واریانس تجمعی % Cumulative variance%
PC1	878.2	977.31	977.31
PC2	207.2	522.24	500.56
PC3	252.1	914.13	414.70

مؤلفه اصلی بارگذاری‌شده برای هر متغیر The principal component loaded for each variable									
مؤلفه component	pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	رس (%) Clay (%)	کربن آلی (%) OC (%)	نیتروژن - نیتراتی N-NO ₃ (mg/kg)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol+/kg)	فسفر قابل‌استفاده AP (mg/kg)	پتاسیم قابل‌استفاده AK (mg/kg)	عملکرد Yield (ton/he)
PC1	0.491	0.657	-0.095	-0.269	0.615	-0.175	-0.662	0.772	0.825
PC2	-0.671	0.613	0.2630	0.797	0.512	0.603	0.174	0.050	0.134
PC3	0.311	-0.158	0.837	-0.058	-0.294	0.506	-0.248	0.004	0.151

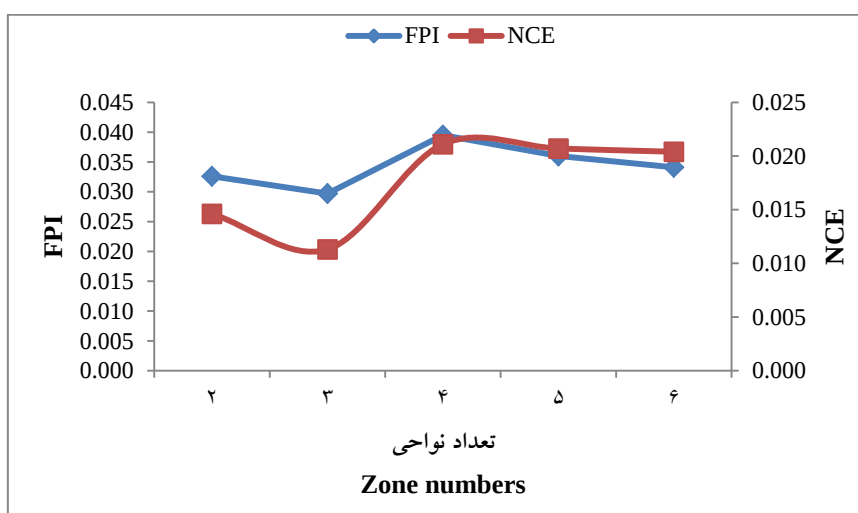
تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی فازی: برای طبقه‌بندی سه مؤلفه اصلی به نواحی مدیریتی، بر اساس مقادیر ویژه برای سه مؤلفه اصلی اول از طریق نرم‌افزار تحلیل‌گر ناحیه مدیریتی به روش c-means فازی انجام شد. خوشه‌بندی سه مؤلفه اصلی با استفاده از شاخص عملکرد فازی (FPI) و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال‌شده (NCE) منجر به سه کلاس بهینه شد. در شکل ۲ مقادیر FPI و NCE برای ۲ تا ۶ ناحیه ترسیم شده است که با توجه به این‌که هر دو شاخص در ناحیه ۳ در حداقل بودند، ۳ ناحیه تعیین گردید. علت عدم انتخاب بیش‌تر از ۶ ناحیه آن است که عملاً تعداد بیش‌تر از شش ناحیه، قابل انجام و عملیاتی در مزرعه به‌واسطه تفکیک زیاد نیست و عملیات اجرایی را بسیار پرهزینه و زمانبر می‌کند. نقشه مناطق (ناحیه‌های) مدیریتی برای تعداد بهینه خوشه در منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نقشه به‌دست آمده ۲۰/۵ هکتار از اراضی مورد مطالعه در ناحیه ۱، ۱۴/۹ هکتار در ناحیه ۲ و ۹/۰۲ هکتار در ناحیه ۳ قرار گرفتند. در همین راستا کومار و همکاران (۲۰۲۴) با انجام تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی c-means فازی و استفاده از دو شاخص FPI و NCE دو ناحیه مدیریتی را در دره باله و حوضه آبریز آن در بخش هیمالیا در هند شناسایی کردند (۳۸). هم‌چنین موه‌رانا و همکاران (۲۰۲۰) با تجزیه و تحلیل ۱۲۲ نمونه خاک و با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی c-means فازی و با کاربرد دو شاخص FPI و NCE موفق به تعیین چهار ناحیه مدیریتی شده که ناهمگونی در عناصر غذایی خاک را نشان دادند (۳۹). ابراهیم‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) نیز بر اساس حداقل میزان FPI و NCE توانستند شش ناحیه مدیریتی را در مزارع کشت گندم دیم در قزوین تعیین کنند (۴۰). جانا و همکاران (۲۰۲۲) ۸۹۶ نمونه خاک که به صورت شبکه‌ای نمونه‌برداری شدند را برای تعیین نواحی

مدیریتی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنان با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش خوشه‌بندی c-means فازی و شاخص‌های FPI و NCE چهار ناحیه مدیریتی را شناسایی کردند که ناحیه اول ۴۳/۳ درصد، ناحیه دوم ۲۹/۴ درصد، ناحیه سوم ۲۷ درصد و ناحیه چهارم ۰/۳ درصد از منطقه را شامل شدند (۴۱).

برای ارزیابی این‌که آیا استفاده ترکیبی از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی می‌تواند در توصیف تغییرپذیری مکانی خصوصیات شیمیایی خاک، مؤثر باشد، از تجزیه و تحلیل واریانس در میان سه ناحیه مدیریتی مختلف، استفاده شد (جدول ۶). در بین سه ناحیه مدیریتی تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین EC، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل‌استفاده و عملکرد وجود دارد. تفاوت معنی‌داری بین نواحی ۱ و ۲ از نظر pH، درصد ذرات رس، درصد کربن آلی و نیتروژن نیتراتی وجود ندارد، ولی بین دو ناحیه مدیریتی ۱ و ۳ تفاوت معنی‌داری در بین این خصوصیات خاکی وجود دارد. براساس جدول ۸ تفاوت معنی‌داری بین متغیرهای دو ناحیه جداشده ۱ و ۳ وجود داشت. تفاوت معنی‌داری بین پتاسیم قابل‌استفاده در دو ناحیه مدیریتی ۱ و ۲ وجود ندارد ولی با ناحیه ۳ از نظر پتاسیم قابل‌استفاده تفاوت زیادی دارد. در این منطقه برای هر سه ناحیه مدیریتی مقدار پتاسیم قابل‌دسترس خاک از حد بحرانی ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بالاتر است و نیاز چندانی به کود پتاسه در این نواحی ندارد. مقدار فسفر قابل‌استفاده برای ناحیه ۳ از دو ناحیه دیگر بیش‌تر و نزدیک به حد بحرانی فسفر (حدود ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. هر سه ناحیه نیاز به کود فسفره دارند، اما مقدارشان برای هریک از نواحی متفاوت است. مقدار حد بحرانی نیتروژن نیتراتی حدود ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است، که ناحیه سوم به این مقدار نزدیک‌تر است و نسبت به دو ناحیه

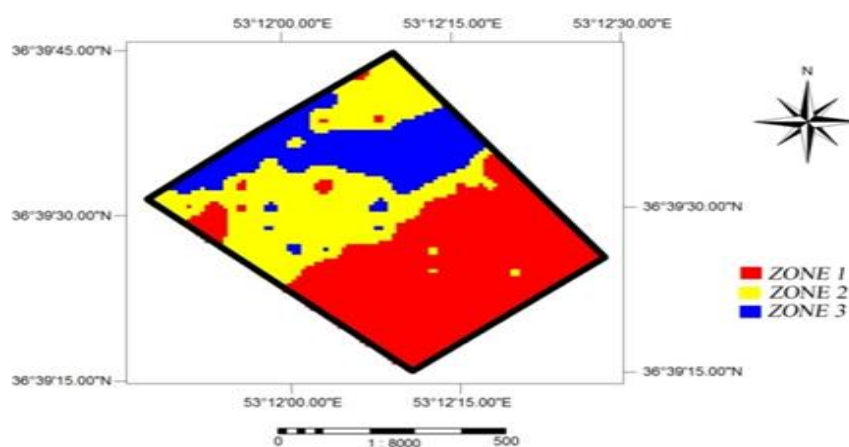
درصد کربن آلی بالاتر) و ظرفیت بافری بالاتر (به علت بالا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی) بهترین شرایط را از نظر عناصر غذایی داراست. مساحت این منطقه با توجه به شکل ۳ کوچکتر از دو ناحیه دیگر با ۹/۰۲ هکتار است. pH برای هر سه ناحیه مدیریتی بین ۷/۶۵-۷/۷۶ متنوع بود و هیچ تأثیر خاصی بر مواد مغذی در دسترس خاک نداشت. در ناحیه مدیریتی ۱ و ۲، به خاطر پایین بودن سطح حاصلخیزی و به منظور بهبود کیفیت گندم، افزایش میزان کودهای کاربردی توصیه می‌شود.

دیگر نیاز به کود نیترا ته کم تر دارد. ناحیه مدیریتی ۱ با رس خاک پایین تر، مقدار درصد کربن آلی پایین تر و ظرفیت تبادل کاتیونی پایین تر، نشان دهنده پتانسیل باروری پایین خاک نسبت به دو ناحیه دیگر است. علاوه بر این، در ناحیه مدیریتی ۱ نیتروژن نیتراتی از دو ناحیه دیگر کم تر بود که می توان به دلیل تلفات بالای نیتروژن از طریق آبیاری و رس کم تر اشاره کرد. ناحیه مدیریتی ۳، به دلیل ذخایر بالاتر عناصر غذایی و یا میزان نفوذ کم تر آب (به دلیل رس بالاتر)، ظرفیت ذخیره نیتروژن نیتراتی بالاتر (به علت مقدار



شکل ۲- شاخص عملکرد فازی (FPI) و آنتروپی طبقه بندی نرمال شده (NCE) برای تعداد مختلفی از کلاس خوشه ای.

Figure 2. Fuzzy function index (FPI) and normalized classification entropy (NCE) for a number of cluster classes.



شکل ۳- پراکنش مکانی سه ناحیه مدیریتی جدا شده حاصلخیزی خاک برای منطقه مورد مطالعه.

Figure 3. The spatial distribution of three delineated soil fertility management zones in the study area.

جدول ۶- تجزيه و تحليل واريانس يك طرفه از خصوصيات خاك براي سه منطقه مديريتي.

Table 6. One-way analysis of variance of soil properties for the three management zones.

Management zones	تعداد	pH	EC (dS/m)	رسي (%)	كربن آلي (%)	ظرفيت تبادل کاتیوني CEC (cmol ⁺ /kg)	نيتروژن نيتراتي N-NO ₃ (mg/kg)	فسفر قابل استفاده AP (mg/kg)	پتاسيم قابل استفاده AK (mg/kg)	عملکرد Yeld (kg/ha)	مساحت Area (ha)
1	51	7.76 ^a	0.42 ^c	40.50 ^b	2.11 ^b	22.23 ^c	5.85 ^b	8 ^c	315.20 ^b	4665.80 ^c	20.5
2	31	7.75 ^a	0.62 ^b	43.60 ^b	2.41 ^b	31.08 ^b	6.02 ^b	10 ^b	310.80 ^b	6372.70 ^b	14.90
3	26	7.65 ^b	0.96 ^a	47.14 ^a	2.89 ^a	33.27 ^a	12.03 ^a	13.20 ^a	410 ^a	8513.70 ^a	9.1

نتيجه گيري كلي

به‌طورکلي وضعيت عناصر غذايي در زمين‌هاي زراعي اين منطقه از نظر توزيع جغرافيايي يکسان نمي‌باشد. بنابر اين لازم است جهت جلوگيري از افزايش هزينه توليد و دستيابي به توليد مطلوب از توصيه مصرف کود به‌طور يکسان، خودداري نمود. با بررسي تغييرپذيري مکاني خصوصيات حاصلخيزي خاک توسط ابزارهاي زمين‌آماري، تجزيه و تحليل مؤلفه‌هاي اصلي و الگوريتم خوشه‌بندي فازي در نرم‌افزار تحليل گر ناحيه مديريتي مشخص شد اين شيوه در شناسايي ناحيه‌هاي مديريتي در اراضي مسطح و به‌ظاهر يکنواخت داراي توانايي خوبي براي تفکيک ناحيه‌هاي مديريتي است و مي‌توان براي ساير مناطق نيز در استان مازندران و حتي کشور توصيه نمود. اما شايد ذکر اين امر نياز به يکپارچه‌سازي اراضي و الزام به انجام يک مديريت واحد در اراضي يا مساحت زياد و رهايي از مديريت‌هاي فردي خرده‌مالکان است. تعداد بهينه ناحيه مديريتي براي منطقه مورد مطالعه سه بود و تجزيه و تحليل واريانس يک ناهمگوني را ميان خصوصيات حاصلخيزي خاک نشان داد. با توجه به نتايج به‌دست آمده مي‌توان با مديريت در کاربرد کودهاي عناصر غذايي پرمصرف مانند نيتروژن (اوره)، فسفر (سوپر فسفات تريپل) و پتاسيم (سولفات پتاسيم) هم عملکرد گندم را در اراضي افزايش داد و

ضمن کم کردن مصرف کود، هزينه توليد و هم‌چنين به حفظ منابع زيرزميني به‌واسطه بالا بودن سطح آب در اين اراضي اقدام مؤثري برداشت. اطلاعات به‌دست آمده، اساسي را براي مديريت منطقي مواد غذايي خاک و کاربرد کود در اراضي گندم فراهم کرده است. در نتيجه کاربرد مديريت ويژه مکاني باعث به حداکثر رساندن بهبود توليد پايدار گندم و در نظر گرفتن ملاحظات زيست‌محيطي خواهد شد. تغييرات معني‌دار مشاهده شده در خصوصيات خاک و عملکرد گندم در ناحيه‌هاي جداشده، نشان‌دهنده عملکرد مناسب ادغام روش‌هاي فازي و زمين‌آمار در شناسايي ناحيه‌هاي مديريتي است. غيريکنواختي توزيع عناصر غذايي دلالت بر لزوم انتخاب راهکار مديريت ويژه مکاني به‌جاي مصرف يکنواخت کودهاي شيميايي در اراضي مورد مطالعه است و مي‌توان با مصرف بيش‌تر کود در مناطق دچار کمبود و اجتناب از مصرف غيرضروري و زياد کودهاي شيميايي در ناحيه‌هايي که غلظت عناصر غذايي در حد کفايت است به توليد پايدار، افزايش درآمد و حفظ محيط زيست کمک کرد. پيشنهاده مي‌شود براي کاهش هزينه‌هاي مطالعات، از تفسير و شاخص‌هاي قابل استخراج از داده‌هاي سنجش از دور و مدل‌هاي رقومي ارتفاع نيز در استفاده گردد و امکان استفاده آن‌ها براي افزايش دقت و کاهش هزينه مورد استفاده قرار گيرد.

منابع

1. Ameer, S., Cheema, M. J. M., Khan, M. A., Amjad, M., Noor, M., & Wei, L. (2022). Delineation of nutrient management zones for precise fertilizer management in wheat crop using geo-statistical techniques. *Soil use and Management*, 38 (3), 1430-1445. **doi:10.1111/sum.12813.**
2. Metwally, M. S., Shaddad, S. M., Liu, M., Yao, R. J., Abdo, A. I., Li, P., & 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. **doi: 10.3390/su11247084.**
3. Tripathi, R., Kumar, N. A., Biswaranjan, D., Mohammad, S., Banwari, L., Priyanka, G., & Kumar, S. A. (2019). Assessing soil spatial variability and delineating site-specific management zones for a coastal saline land in eastern India. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65 (13), 1775-1787. **doi: 10.1080/03650340.2019.1578345.**
4. 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. **doi:10.1002/ldr.5357.**
5. 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). **doi: 10.3390/w15183278.**
6. Behera, S. K., Ravi, K., Mathur, R. K., Shukla, A. K., Suresh, K., & Prakash, C. (2018). Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. *Catena*, 165 (6), 251-259. **doi: 10.1016/j.catena.2018.02.008.**
7. Shukla, A. K., Sinha, N. K., Tiwari, P. K., Prakash, C., Behera, S. K., Lenka, N. K., Singh, V. K., Dwivedi, B. S., Majumdar, K., Kumar, A., Srivastava, P. C., Pachauri, S. P., Meena, M. C., Lakaria, B. L., & Siddiqui, S. (2017). Spatial distribution and management zones for sulfur and micronutrients in Shiwalik Himalayan region of India. *Land Degradation and Development*, 28, 959-969. **doi: 10.1002/ldr.2673.**
8. Nawar, S., Corstanje, R., Halcro, G., Mulla, D., & Mouazen, A. M. (2017). Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. *Advances in Agronomy*, 143, 175-245. **doi: 10.1016/bs.agron.2017.01.003.**
9. 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. P 65-80, In: S. Dharumarajan, S. Kaliraj, K. Adhikari, M. Lalitha, and N. Kumar (eds.), *Remote Sensing of Soils*, Elsevier. **doi:10.1016/B978-0-443-18773-5.00025-9.**
10. 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), 1-17. **doi: 10.3390/su12145809.**
11. 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. **doi:10.22059/ijswr.2023.361179.669518.** [In Persian].
12. Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. 11th Edition. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. 346p.

13. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, M. (1992). *Methods of Soil Analysis. Part 1, Chemical and mineralogical properties*. 1st ed., SSSA Pub., Madison, WI.
14. Gee, G. W., & Bauder, J. (1982). Particle Size Analysis. P 384-412, In: A. L. Page, R. H., Miller, and D. R., Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison. WI. **doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15.**
15. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. P 539-579. In: A. L. Page, R. H., Miller, and D. R., Keeney (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2th ed. ASA. SSSA. Madison. WI. **doi: 10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29.**
16. 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. **doi: 10.1080/00103629009368334.**
17. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. P 403-430. In: A. L. Page, R. H., Miller, and D. R., Keeney (eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Monograph no 9. American Society of Agronomy. Madison. WI. **doi: 10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24.**
18. Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Department of Agriculture. Agricultural Handbook No. 60, Washington DC, 7-53. **doi: 10.1097/00010694-195408000-00012.**
19. Bower, C. A. (1954). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73, 251-261. **doi:10.1097/00010694-195204000-00001.**
20. Sharma, B. D., Arora, H., Kumar, R., & Nayyar, V. K. (2004). Relationships between soil characteristics and total and DTPA extractable micronutrients in inceptisols of Punjab. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35, 799-818. **doi: 10.1081/CSS-120030359.**
21. Wilding, L. P., & Dress, L. R. (1983). Application of geostatistics to spatial studies of soil. In: B.B., Trangmar, R.S., Yost, and G. Uehara (eds.), *Advances in Agronomy*.
22. Nourzadeh Haddad, M., Mahdian, M. H., & Malakouti, M. J. (2013). Efficiency comparison of some geostatistical methods for investigating spatial variability of micro nutrients in agricultural lands, case study: Hamadan Province. *Water and Soil Science*, 23 (1), 71-81. [In Persian]
23. Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58 (5), 1501-1511. **doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.**
24. 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. **doi: 10.1016/j.geodrs.2022.e00564.**
25. Babazadeh, S. H., Davatgar, V., Darighoftar, F., & Paykan, M. (2012). Spatial variation of some soil characteristics associated with fertilization in rice farms of Guilan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 2 (1), 140-127. [In Persian]
26. 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. **doi: 10.1016/j.geoderma.2011.12.005.**
27. Hosnepak, A. (2007). *Geostatistics*. Tehran University Press. second edition. 314p.

28. Bagherzadeh, A., Abbaszadeh, M., & Afshar, E. (2023). Evaluation of nutrient elements distribution in soil to optimize fertilizer's consumption by wheat cultivation. *Sustainable Agricultural Science Research*, 4 (2), 34-54. **doi: 10.30495/sarj.2023.1976445.1111.** [In Persian]
29. Pirdashti, H., Aghaeipour, N., Zavareh, M., Asadi, H., & Bahmanyar, M. A. (2018). Evaluation of spatial variability of some soil chemical and physical properties in Foumanat Plain paddies using geostatistic methods. *Applied Field Crops Research*, 31(4), 50-71. **doi: 10.22092/aj.2018.116019.1206.** [In Persian]
30. 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. *Journal of Water and Soil Science*, 20(76), 177-187. **doi:10.18869/acadpub.jstnar.20.76.177.** [In Persian].
31. Jalali, Gh., Tehrani, M., Borromand, N., & Sanjari S. (2013). Comparison of land statistics methods in the preparation of spatial distribution map of some elements in east of Mazandaran Province. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 27 (2), 204-195. [In Persian]
32. 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. **doi: 10.1007/s40808-022-01402-w.**
33. Karwariya, S., Dey, P., Bhogal, N. S., Kanga, S., & Singh, S. K. (2021). A Comparative Study of Interpolation Methods for Mapping Soil Properties: A Case Study of Eastern Part of Madhya Pradesh, India. *Recent Technologies for Disaster Management and Risk Reduction: Sustainable Community Resilience & Responses*, 431-449. **doi: 10.1007/978-3-030-76116-5_22.**
34. Jiang, H. L., Liu, G. S., Liu, S. D., Li, E. H., Wang, R., Yang, Y. sF., & Hu, H. C. (2012). Delineation of site-specific management zones based on soil properties for a hillside field in central China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(10), 1075-1090. **doi:10.1080/03650340.2011.570337.**
35. Yuan, Y., Shi, B., Yost, R., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cao, Q. (2022). Optimization of Management Zone Delineation for Precision Crop Management in an Intensive Farming System. *Plants*, 11 (19), 1-19. **doi: 10.3390/plants11192611S.**
36. Wang, X. Z., Liu, G. S., Hu, H. C., Wang, Z. H., & Liu, Q. sH. (2009). Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65, 168-175. **doi: 10.1016/j.compag.2008.08.008.**
37. 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. **doi: 10.1007/s10668-022-02411-6.**
38. Kumar, P., Sharma, M., Butail, N. P., Shukla, A. K., & Kumar, P. (2024). Spatial variability of soil properties and delineation of management zones for Suketi basin, Himachal Himalaya, India. *Environment, Development and Sustainability*, 26 (6), 14113-14138. **doi: 10.1007/s10668-023-03181-5.**
39. 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. **doi: 10.1007/s11119-019-09671-9.**

40. 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. **doi:10.22059/ijswr.2023.361179.669518**. [In Persian]
41. Jena, R. K., Bandyopadhyay, S., Pradhan, U. K., Moharana, P. C., Kumar, N., Sharma, G. K., Roy, P. D., Ghosh, D., Ray, P., Padua, S., Ramachandran, S., Das, B., Singh, S. K., Ray, S. K., Alsuhaibani, A. M., Gaber, A., & Hossain, A. (2022). Geospatial Modelling for Delineation of Crop Management Zones Using Local Terrain Attributes and Soil Properties. *Remote Sensing*, 14 (9), 1-24. **doi: 10.3390/rs14092101**.

