



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 Sadeh-Zadeh⁴

1. Former M.Sc. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: sahar1368@mihanmail.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. Prof., 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

ABSTRACT

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 29.04.2025
Revised:
Accepted:

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

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

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

Results: The best interpolation method for pH, EC, organic carbon were IDW with power of 2 and 1, and kriging, respectively. The best interpolation method for CEC was IDW with power of 1 and for other soil properties the kriging method had best interpolation results. The map of soil properties with the resolution of 15 m interval was prepared with the best identified interpolation methods at the field. The PCA was done on all interpolated points and then the fuzzy clustering algorithm with MZA software was used to identify the homogenous management zones. The fuzziness performance index (FPI) and normalized classification entropy (NEC) was used to determine the optimal number of clusters. The study

area was divided into three management zones, with 20.5 hectares located 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 the 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 the 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. 2025. 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*, 13 (1), 1-25.



© The Author(s).

DOI: -----

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*}، محمد علی بهمنیار^۳، فردین صادق‌زاده^۴

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه 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: mostafa.emadi@sanru.ac.ir mostafaemadi@gmail.com
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 |
|--|---|
| <p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹</p> <p>تاریخ ویرایش:</p> <p>تاریخ پذیرش:</p> | <p>سابقه و هدف: در حال حاضر، روش‌های کارآمد و مقرون به‌صرفه برای مدیریت مزارع به‌منظور به‌حداکثر رساندن بازده اقتصادی و به‌حداقل رساندن اثرات زیست محیطی، مورد نیاز است. توصیه کودی در حال حاضر برای مزارع تقریباً در ایران برای مناطق بزرگ معمولاً یکنواخت انجام می‌شود. فلذا 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 این رو بایستی روش‌های کارآمد برای اندازه‌گیری دقیق تغییرات ویژگی‌های خاک درون مزرعه و تعیین نواحی مدیریتی همگن برای کاربرد متعادل کودها اجرا شوند.</p> |
| <p>واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، کریجینگ، نواحی مدیریتی، پتاسیم قابل استفاده، کربن آلی خاک</p> | <p>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 قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده، 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. به‌منظور تخمین نقاط در محل‌های نمونه‌برداری نشده از روش‌های کریجینگ و</p> |

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 قابل‌استفاده 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 نرمال‌شده (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. بالعکس در نواحی مدیریتی ۱ و ۲، به‌خاطر 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 موثری 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، صادق زاده، فردین (۱۴۰۴). 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، ۱۳ (۱)، ۱-۲۵

DOI: -----



© 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، به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در حل این مشکل شناخته شده است و برای دستیابی به کشاورزی پایدار به‌عنوان 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 به‌منظور 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). به‌عنوان مثال جنا 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 به‌منظور 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 به‌ترتیب بالاترین کیفیت خصوصیات خاک در ناحیه ۵، ۲، ۶، ۱، ۳ و ۴ وجود داشت (۱۰). در پژوهش دیگر ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) 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).

به‌طور کلی 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 زمین‌آمار 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

1- Site-specific management

2- Management zone

دقیقه و ۲۹ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۹ 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 به ترتیب 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 خشک شدن 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 رنگ سنجی (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 تغییرنا 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 تغییرناها استفاده گردید. سپس مدل‌های نیم تغییرنا مانند کروی، نمای، گوسی و خطی بر نیم تغییرنمای تجربی برازش داده شد. ارزیابی بهترین مدل برازش داده شده بر نیم تغییرنا با استفاده از ضریب تبیین (R^2) و مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) انجام شد (۲۰). به منظور برآورد مقادیر متغیرهای خاک در نقاط نمونه-برداری 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 به صورت 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

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

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 فازی شدن در مقدار متداول خود یعنی ۱/۳۵ و طبقه‌بندی برای دامنه‌ای از کلاس‌های ۲ تا ۶ تکرار شد (۸). سپس مقدار شاخص کارآمدی فازی شدن یا FPI و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده یا NCE که در زیر معادلات آن‌ها آمده است، خوشه‌ها یا دسته‌های جدا شده در منطقه به‌فصلت آمد (۶) و انتخاب تعداد زون‌های مدیریتی با کمترین آماره‌های ذکر شده انجام شد:

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

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

در این معادلات c: تعداد خوشه؛ n: تعداد



شکل ۱- محل نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Soil sampling points in the study area.

نتایج و بحث

(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 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

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 |
| Clay (%) | 1.7 | 1.9 | 2.2 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 6.3 | 19.6 |
| کربن آلی (%) | 0.2 | 0.5 | 1.8 | 2.9 | 4.3 | 5.8 | 6.9 | 37.9 | 88.6 |
| OC (%) | 7.1 | 9.7 | 20.7 | 26.3 | 28.9 | 30.6 | 31.1 | 44.3 | 24.7 |
| نیتروژن نیتراتی (N-NO ₃ (mg/kg) | 2.7 | 3.2 | 4.8 | 6.6 | 8.7 | 10.9 | 12.1 | 36.4 | 61.1 |
| ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC (Cmol ⁺ /kg) | 146.8 | 146.4 | 245.6 | 288.8 | 320.7 | 348.4 | 357.6 | 551.7 | 24.6 |
| فسفر قابل‌استفاده (Available phosphorus (AP) (mg/kg) | 2.9 | 3.2 | 4.1 | 4.7 | 5.3 | 5.5 | 6.1 | 11.8 | 28.9 |
| پتاسیم قابل‌استفاده (Available Potassium (AK) (mg/kg) | Yeild (tone/ha) | | | | | | | | |

شده‌است. به‌طور کلی برای داده‌هایی با توزیع نرمال از ضریب همبستگی پیرسون و برای داده‌هایی با توزیع غیر نرمال از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده می‌کنند. در منطقه مورد مطالعه، تقریباً تمام متغیرها به‌طور

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

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 | 0.25* | 0.28** | 0.23* | 0.13 | 0.21 | 0.29** | 0.290** | 0.193 |
| pH | | 1 | -0.092 | -0.33** | -0.03 | -0.20* | -0.04 | -0.12 | -0.19* |
| EC (ds/m) | | | 1 | 0.13 | 0.03 | -0.12 | -0.187 | 0.754** | -0.03 |
| کربن آلی (%) OC (%) | | | | 1 | 0.18 | 0.19* | 0.22* | 0.31* | 0.21* |
| رس (%) Clay (%) | | | | | 1 | -0.09 | 0.26* | -0.12 | 0.19* |
| فسفر قابل استفاده AP (mg/kg) | | | | | | 1 | 0.27** | -0.157 | 0.15 |
| پتاسیم قابل استفاده AK (mg/kg) | | | | | | | 1 | -0.25** | 0.25* |
| نیتروژن نیتراتی N-NO ₃ (mg/kg) | | | | | | | | 1 | -0.15 |
| ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (Cmol+/kg) | | | | | | | | | 1 |

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

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

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، نشان دهنده‌ی وابستگی 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 تحت تأثیر قرار گرفتن متغیر از عوامل ذاتی تشکیل‌دهنده خاک است. همچنین ساختار مکانی

برازش بهترین نیم تغییرنا برای خصوصیات خاک: نیم تغییرنا برای توصیف ارتباط مکانی یک متغیر بکار می‌رود و کمیته برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آن نشان می‌دهد (۲۲). بهترین مدل نیم تغییرنمای 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 به خاطر تغییرات تصادفی یا ذاتی و خطای نمونه‌برداری باشد. دامنه تأثیر برای EC کم‌ترین مقدار و برای

به علت وجود تغییرات در فواصل نمونه برداری و یا به دلیل خطای نمونه برداری و اندازه گیری بروز می کند (۲۷). در مطالعه حاضر، برای اکثر متغیرها مدل نیم تغییرنا کروی انتخاب شد. باقرزاده و همکاران (۲۰۲۳) نیز به منظور ارزیابی پراکنش عناصر غذایی و بهینه سازی مصرف کود گندم برای کربن آلی خاک از مدل کروی استفاده کردند (۲۸). همچنین طبق جدول ۳ برای متغیر فسفر قابل استفاده و عملکرد گندم، مدل نمایی به دست 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).

ضعیف نشان دهنده‌ی تحت تأثیر قرار گرفتن متغیر از عامل‌های مدیریتی (مانند عملیات خاک‌ورزی و کود-دهی) 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 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

جدول ۳- پارامترهای نیم تغییرنمای متغیرهای مورد مطالعه.

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

| مجموع مربعات باقی مانده 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 | 01.0 | 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 قابل استفاده AP (mg/kg) |
| 3.209×10^6 | 0.91 | 25.22 | 418 | 2240 | کروی | پتاسیم قابل استفاده AK (mg/kg) |
| 0.313 | 0.94 | 18.31 | 531 | 0.685 | نمایی | عملکرد (تن/هکتار) Yield (ton/ha) |

توان ۲، IDW با توان ۱، کریجینگ معمولی، IDW با توان ۳ به دست آمد. مقدار RMSE به دست آمده برای این متغیرهای pH، EC، درصد ذرات رس و کربن آلی به ترتیب، ۰/۰۹۹، ۰/۲۳، ۲/۹۰، ۰/۳۲ به دست آمد. مقدار RMSE به دست آمده از دو روش کریجینگ و

تعیین بهترین روش تخمین برای خصوصیات خاک: طبق نتایج به دست آمده از جدول ۴ بهترین روش درون‌یابی برای pH، EC، درصد ذرات رس و کربن آلی به ترتیب، روش وزن‌دهی معکوس فاصله IDW با

برداری نشده باشد. مقدار RMSE به‌دست آمده برای متغیرهای CEC، نیتروژن نیتراتی، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده و عملکرد به‌ترتیب ۱/۷۵، ۰/۹۹، ۷/۲۶، ۴۸/۳۰، ۱/۳۹ به‌دست آمد. جلالی و همکاران (۲۰۱۳) بهترین روش ارزیابی برای تخمین فسفر قابل‌استفاده و پتاسیم قابل‌استفاده در نقاط نمونه- برداری نشده را روش کریجینگ پیشنهاد کردند، زیرا از صحت بیش‌تری برخوردار بود (۳۱). شاهین‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) روش کریجینگ معمولی را برای پتاسیم قابل‌استفاده، رس و pH پیشنهاد کردند (۳۲). کارواریا و همکاران (۲۰۲۱) نیز در مطالعه‌ای در بخش شرقی مادیا پرادش هند عنوان کردند روش کریجینگ معمولی برای پتاسیم قابل‌استفاده، گوگرد و pH و روش IDW برای نیتروژن، کربن آلی و فسفر قابل‌استفاده خوب عمل کردند (۳۳).

وزن‌دهی معکوس فاصله تفاوت چندانی نداشت، که نشان‌دهنده این موضوع است که زمین‌آمار می‌تواند روش خوبی برای تخمین این متغیرها در نقاط نمونه- برداری نشده باشد. ایوبی و همکاران (۲۰۱۶) بهترین روش ارزیابی برای تخمین درصد کربن آلی در نقاط نمونه‌برداری نشده را روش کریجینگ پیشنهاد کردند، زیرا از صحت بیش‌تری برخوردار بود (۳۰). طبق نتایج به‌دست آمده از جدول ۴ بهترین روش درون-یابی برای پارامترهای CEC، نیتروژن قابل‌استفاده، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده و عملکرد به‌ترتیب، روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) با توان ۱ و برای بقیه پارامترها روش کریجینگ انتخاب شد. مقدار RMSE به‌دست آمده از دو روش کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله تفاوت چندانی نداشت، که مبین این نظر است که زمین‌آمار می‌تواند روش خوبی برای تخمین این متغیرها در نقاط نمونه-

جدول ۴- نتایج ارزیابی روش‌های کریجینگ و IDW پارامترهای خاک.

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

| خطای میانگین مجذور مربعات خطا RMSE | خطای میانگین ME | بهترین روش Best metod | پارامترها Parameters |
|---------------------------------------|-----------------|--------------------------|--|
| 0.099326 | 0.009251 | IDW با توان ۲ | pH |
| 0.231686 | 0.0425 | IDW با توان ۱ | EC (dS/m) |
| 2.901742 | -1.01523 | کریجینگ معمولی | رس (%) Clay(%) |
| 0.325386 | -0.05952 | IDW با توان ۳ | کربن آلی (%) OC (%) |
| 0.992909 | -0.45144 | کریجینگ معمولی | نیتروژن-نیتراتی N-NO ₃ (mg/kg) |
| 1.756219 | 0.461201 | IDW با توان ۱ | ظرفیت کاتیون تبادل CEC (Cmol+/kg) |
| 7.265528 | 2.117722 | کریجینگ معمولی | فسفر قابل‌استفاده AP (mg/kg) |
| 48.30799 | -9.65131 | کریجینگ معمولی | پتاسیم قابل‌استفاده AK (mg/kg) |
| 1.391265 | 0.346618 | کریجینگ معمولی | عملکرد Yield (ton/ha) |

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

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی: از آنجا که اکثر خواص با یکدیگر همبستگی داشتند (جدول ۲)، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی به‌منظور خلاصه نمودن

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 بیش تر بودند و ۶۹/۴۸ درصد واریانس کل را شامل شدند، شناسایی کردند. مؤلفه‌های اصلی PC1، PC2، PC3، PC4، PC5 به ترتیب ۲۰/۴۴، ۱۷/۱۹، ۱۳/۲۲، ۹/۵۹ و ۹/۰۴ درصد از واریانس را شامل شدند. همچنین نتایج آنان نشان داد PC1 تحت تأثیر EC، pH و رس، PC2 تحت تأثیر فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده، شیب و پایداری خاک سطحی، PC3 تحت تأثیر نیتروژن کل و کربن کل، PC4 تحت تأثیر ارتفاع و PC5 تحت تأثیر شاخص رطوبت زمین بودند (۳۷).

و با pH، نیتروژن، فسفر، پتاسیم قابل استفاده 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 به ترتیب ۴۱/۹۹، ۱۹/۱۷، ۱۲/۷۳ درصد از واریانس کل بود. مؤلفه اصلی اول تحت تأثیر مواد آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک بود. مؤلفه اصلی دوم تحت تأثیر pH و ظرفیت تبادل کاتیونی، مؤلفه اصلی سوم نیز تحت تأثیر 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)

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 توجیه شده٪ 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 بارگذاری شده 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 قابل استفاده AP (mg/kg) | پتاسیم قابل استفاده 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 |

شاخص عملکرد فازی (FPI) و شاخص آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده (NCE) منجر به سه کلاس بهینه شد. در شکل ۲ مقادیر FPI و NCE برای ۲ الی ۶ ناحیه ترسیم شده است که با توجه به اینکه هر دو شاخص در ناحیه ۳ در حداقل بودند، ۳ ناحیه تعیین

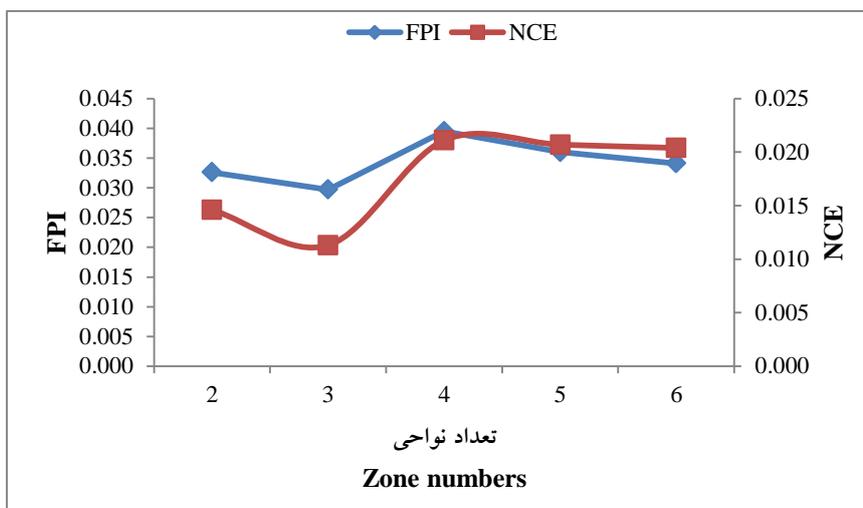
تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی فازی: برای طبقه‌بندی سه مؤلفه اصلی به نواحی مدیریتی، بر اساس مقادیر ویژه برای سه مؤلفه اصلی اول از طریق نرم افزار تحلیل‌گر ناحیه مدیریتی به روش c-means فازی انجام شد. خوشه‌بندی سه مؤلفه اصلی با استفاده از

تواند 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 جدا شده او ۳ وجود داشت. تفاوت معنی‌داری بین پتانسیم قابل‌استفاده در دو ناحیه مدیریتی ۱ و ۲ وجود ندارد ولی با ناحیه ۳ از نظر پتانسیم قابل‌استفاده تفاوت زیادی دارد. در این منطقه برای هر سه ناحیه مدیریتی مقدار پتانسیم 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 هر یک 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 دیگر نیاز به کود نیتراکام‌تر دارد. ناحیه مدیریتی ۱ با رس خاک پایین‌تر، مقدار درصد کربن آلی پایین‌تر و ظرفیت تبادل کاتیونی پایین‌تر، نشان‌دهنده پتانسیل باروری پایین خاک نسبت به دو ناحیه دیگر است. علاوه بر این، در ناحیه مدیریتی ۱ نیتروژن نیتراتی از دو ناحیه دیگر کم‌تر بود که می‌توان به دلیل تلفات بالای نیتروژن از طریق آبشویی و رس کم‌تر اشاره کرد. ناحیه مدیریتی ۳، به دلیل ذخایر بالاتر عناصر

گردید. علت عدم انتخاب بیشتر از ۶ ناحیه آن است که عملاً تعداد بیشتر از شش ناحیه، قابل انجام و عملیاتی در مزرعه بواسطه تفکیک زیاد نیست و عملیات اجرایی را بسیار پر هزینه 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 موهراانا 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). جنا 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 می-

غذایی و یا میزان نفوذ کم تر آب (به دلیل رس بالاتر)، ناحیه مدیریتی بین ۷/۷۶-۷/۶۵ متنوع بود و هیچ تأثیر

ظرفیت
ذخیره
نیتروژن
نیتراتی
بالاتر
(به علت)
مقدار درصد
کربن آلی
بالاتر) و
ظرفیت

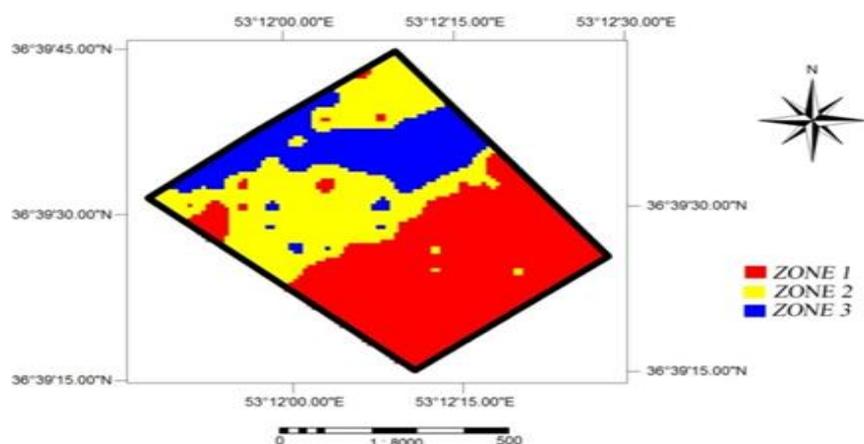


پایین بودن سطح حاصلخیزی و به منظور بهبود کیفیت گندم، افزایش میزان کودهای کاربردی توصیه می شود.

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 کوچک تر از دو ناحیه دیگر با ۹/۰۲ هکتار است. pH برای هر سه

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 جداشده حاصلخیزی خاک برای منطقه مورد مطالعه.
Figure 3. The spatial distribution of three delineated soil fertility management zones in the study area.

جدول ۶- تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه از خصوصیات خاک برای سه منطقه مدیریتی.

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

| مساحت Area (ha) | عملکرد Yeild (kg/ha) | پتاسیم قابل استفاده AK (mg/kg) | فسفر قابل استفاده AP (mg/kg) | نیتروژن نیتراتی N-NO ₃ (mg/kg) | ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol ⁺ /kg) | کربن آلی OC (%) | رس Clay (%) | EC (dS/m) | pH | تعداد Number | نواحی مدیریتی management zones |
|-----------------------|----------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--------------------|-------------------|--------------|-------|-----------------|-----------------------------------|
| 20.5 | 4665.80c | 315.20b | 8c | 5.85b | 22.23c | 2.11b | 40.50b | 0.42c | 7.76a | 51 | 1 |
| 14.90 | 6372.70b | 310.80b | 10b | 6.02b | 31.08b | 2.41b | 43.60b | 0.62b | 7.75a | 31 | 2 |
| 9.1 | 8513.70a | 410a | 13/20a | 12.03a | 33.27a | 2.89a | 47.14a | 0.96a | 7.65b | 26 | 3 |

نتیجه‌گیری کلی

می‌توان برای سایر مناطق نیز در استان مازندران و حتی کشور توصیه نمود. اما شایان ذکر است این امر نیاز به یکپارچه‌سازی اراضی و الزام به انجام یک مدیریت واحد در اراضی یا مساحت زیاد و رهایی از مدیریت‌های فردی خرده‌مالکان است. تعداد بهینه ناحیه مدیریتی برای منطقه مورد مطالعه سه بود و تجزیه و تحلیل واریانس یک ناهمگونی را میان خصوصیات حاصلخیزی خاک نشان داد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان با مدیریت در کاربرد کودهای عناصر غذایی پرمصرف مانند نیتروژن (اوره)، فسفر (سوپر فسفات تریپل) و پتاسیم (سولفات

به‌طور کلی وضعیت عناصر غذایی در زمین‌های زراعی این منطقه از نظر توزیع جغرافیایی یکسان نمی‌باشد. بنابراین لازم است جهت جلوگیری از افزایش هزینه تولید و دستیابی به تولید مطلوب از توصیه مصرف کود به‌طور یکسان، خودداری نمود. با بررسی تغییرپذیری مکانی خصوصیات حاصلخیزی خاک توسط ابزارهای زمین‌آمار، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی در نرم‌افزار تحلیل‌گر ناحیه مدیریتی مشخص شد این شیوه در شناسایی ناحیه‌های مدیریتی در اراضی مسطح و به‌ظاهر یکنواخت دارای توانایی خوبی برای تفکیک ناحیه‌های مدیریتی است و

غذایی دلالت بر لزوم انتخاب راهکار مدیریت ویژه مکانی به جای مصرف یکنواخت کودهای شیمیایی در اراضی مورد مطالعه است و می‌توان با مصرف بیش‌تر کود در مناطق دچار کمبود و اجتناب از مصرف غیرضروری و زیاد کودهای شیمیایی در ناحیه‌هایی که غلظت عناصر غذایی در حد کفایت است به تولید پایدار، افزایش درآمد و حفظ محیط زیست کمک کرد. پیشنهاد میشود برای کاهش هزینه‌های مطالعات، از تفسیر و شاخصهای قابل استخراج از داده‌های سنجش از دور و مدل‌های رقومی ارتفاع نیز در استفاده گردد و امکان استفاده آنها برای افزایش دقت و کاهش هزینه مورد استفاده قرار گیرد.

پتاسیم) هم عملکرد گندم را در اراضی افزایش داد و ضمن کم‌کردن مصرف کود، هزینه تولید و همچنین به حفظ منابع زیرزمینی به‌واسطه بالا بودن سطح آب در این اراضی اقدام مؤثری برداشت. اطلاعات به‌دست آمده، اساسی را برای مدیریت منطقی مواد غذایی خاک و کاربرد کود در اراضی گندم فراهم کرده است. در نتیجه کاربرد مدیریت ویژه مکانی باعث به حداکثر رساندن بهبود تولید پایدار گندم و در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی خواهد شد. تغییرات معنی‌دار مشاهده شده در خصوصیات خاک و عملکرد گندم در ناحیه‌های جداشده، نشان‌دهنده عملکرد مناسب ادغام روش‌های فازی و زمین‌آمار در شناسایی ناحیه‌های مدیریتی است. غیریکنواختی توزیع عناصر

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 & 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), 5809. 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*. 1nd ed., SSSA Pub., Madison, WI.
 14. Gee, G.W., & Buaeder, 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.geoder.2022.e00564**.
25. Babazadeh, S. h., Davatgar, V., Darighgoftar, 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. Hosnipak, 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 [Research]. *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), 2611. 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), 2101. doi: **10.3390/rs14092101**.