



Using topographical and spectral indices to delineate management zone in drylands wheat cultivated area, Qazvin.


Golnaz Ebrahimzadeh¹ , Nafiseh Yaghmaeian Mahabadi² , Hossein Bayat³ ,
HamidReza Matinfar⁴ 

1. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran; E-mail: ebrahimzade.golnaz@gmail.com.

2. Corresponding Author Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran; E-mail: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran; E-mail: h.bayat@basu.ac.ir

4. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Lorestan University, Lorestan, Iran; E-mail: matinfar.h@lu.ac.ir.

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: June. 24, 2023</p> <p>Revised: Aug. 12, 2023</p> <p>Accepted: Aug. 16, 2023</p> <p>Published online: Sep. 23, 2023</p> <p>Keywords: Management Zones, Fuzzy Clustering, Geostatitics.</p>	<p>Sustainable soil management with a correct understanding of soil properties helps to maintain soil fertility and prevent soil degradation. This research was conducted to evaluate the potential use of soil management zones (MZs) as an efficient method to improve the productivity of wheat cultivation. According to this, 140 soil samples were taken randomly from wheat fields. Physical and chemical properties, along with topographical and spectral indices, were used to delineate MZs. Topographic attributes were extracted from digital elevation model (DEM) map prepared in SAGA GIS 7.8.2 software from the study area. Mapping the applied variables, selecting the optimal variable using principal component analysis, and delineating the study area based on soil properties, topographic attributes and spectral indices by using cluster algorithms in combination with geostatistics are major steps for delineating management zones. The fuzziness performance index (FPI) and normalized classification entropy (NCE) were investigated for the number of MZs. The semivariogram and kriging prediction maps showed different spatial distribution patterns, with spatial autocorrelation ranging varies from weak to strong for most of the applied variables. Finally, six principal components (PCs) with an eigenvalue of more than 1 and a total variance of 76.3% were chosen for further analysis. Based on the lowest values of FPI and NCE, six MZs were identified. The mean values demonstrate the difference between the applied properties in the MZs. This study showed that the delineation of MZs can be effectively used in soil management for cultivation crops to maximise crop production.</p>
<p>Cite this article: 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. <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 54 (7), 1005-1026. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361179.669518</p> <p>© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.</p> <p>DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361179.669518</p>	

کاربرد شاخص‌های توپوگرافی و طیفی در تعیین نواحی مدیریتی در مزارع کشت گندم دیم، قزوین

گلناز ابراهیم‌زاده^۱، نفیسه یغمایان مهابادی^۲، حسین بیات^۳، حمید رضا متین‌فر^۴۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: ebrahimzade.golnaz@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: yaghmaecian_na@guilan.ac.ir۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: h.bayat@basu.ac.ir۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: matinfar.h@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مدیریت پایدار خاک با درک صحیح از ویژگی‌های خاک به حفظ حاصلخیزی و جلوگیری از تخریب آن کمک می‌کند. این تحقیق به منظور ارزیابی پتانسیل استفاده از مناطق مدیریت خاک (MZs) به عنوان روشی کارآمد برای بهبود بهره‌وری کشت گندم انجام شد. بر این اساس تعداد ۱۴۰ نمونه خاک از مزارع گندم دیم برداشت شد. از ویژگی‌های خاک به همراه ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی و طیفی جهت تعیین MZs استفاده گردید. ویژگی‌های توپوگرافی مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SAGA ۷.۸.۲ و نقشه DEM منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. تهیه نقشه ویژگی‌ها، انتخاب ویژگی‌های بهینه با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)، تقسیم‌بندی مزرعه بر پایه ویژگی‌های منطقه‌ای و توپوگرافی بهینه با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌ای در ترکیب با زمین‌آمار، مراحل ایجاد MZs در این مطالعه بودند. شاخص عملکرد فازی (FPI) و آنتروپی طبقه‌بندی نرمال شده (NCE) جهت ارزیابی تعداد بهینه MZs بررسی گردید. تجزیه و تحلیل نیم‌تغییرنما، الگوی توزیع مکانی متنوع با وابستگی مکانی متوسط تا قوی را برای اکثر ویژگی‌ها در منطقه مطالعاتی نشان داد. در نهایت شش PC با مقادیر ویژه بیشتر از ۱ با مجموع ۷۶/۳ درصد از واریانس کل برای تجزیه و تحلیل بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس حداقل مقدار FPI و NCE، شش ناحیه مدیریتی شناسایی شد. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان‌دهنده تفاوت در ویژگی‌ها در MZs است. این مطالعه نشان داد که تعیین MZs بر اساس تغییرات مکانی ویژگی‌های توپوگرافی منطقه می‌تواند به طور موثری در شناسایی منابع اصلی تغییرپذیری عملکرد محصول و مدیریت خاک برای به حداکثر رساندن تولید محصول استفاده شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۵/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۱	
واژه‌های کلیدی: نواحی مدیریتی، خوشه‌بندی فازی، زمین‌آمار.	

استناد: ابراهیم‌زاده، گلناز؛ یغمایان مهابادی، نفیسه؛ بیات، حسین؛ و متین‌فر، حمیدرضا (۱۴۰۲). کاربرد شاخص‌های توپوگرافی و طیفی در تعیین نواحی مدیریتی در مزارع کشت گندم دیم، قزوین، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۷)، ۱۰۰۵-۱۰۲۶.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361179.669518>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361179.669518>

مقدمه

در حال حاضر کشاورزی نقش بسیار حساسی در مسائل اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی جوامع دارد. بنابراین مدیریت محصولات کشاورزی، به‌عنوان هدف اصلی و محوری در تامین حفاظت از منابع غذایی برای مردم کشورها تبیین شده است. عمومی‌ترین روش در این خصوص، استفاده از تفکیک ناحیه‌ای است. مدیریت پایدار خاک با درک صحیح از ویژگی‌های خاک به حفظ یا بهبود سطح حاصلخیزی و جلوگیری از تخریب خاک کمک می‌کند، که یک مشکل عمده جهانی مهم است (Zhao et al, 2013; Thapa and Yila, 2012). درک صحیح از توزیع مکانی ویژگی‌های خاک و تهیه نقشه آنها کلید مدیریت مناطق ویژه^۱ خاک جهت تولید پایدار محصول است (Brevik et al, 2016; behera and Shukla, 2015).

تولید محصولات کشاورزی نتیجه عملکرد پیچیده میان عوامل مختلف مانند عملیات مدیریتی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاکی است (Kravchenko et al., 2005). تغییرپذیری عملکرد در مزارع کشاورزی، تابعی از توپوگرافی (Jiang and thelen, 2004)، میزان انرژی دریافتی، تغییرات دما و رطوبت، ماده آلی، عناصر غذایی، بافت و سایر ویژگی‌های خاک و در نتیجه رشد گیاه متاثر از توپوگرافی بوده و می‌تواند بر عملکرد محصول و تولید تاثیرگذار باشد (Iqbal et al., 2005). تغییر در توپوگرافی بر تولید محصول و عملکرد اثر گذاشته و باعث ایجاد الگوهای مختلفی در تغییرپذیری عملکرد محصول می‌گردد (Di Virgilio et al, 2007).

تعریف نواحی مدیریتی^۲ عموماً وابسته به اطلاعات مکانی مرتبط با ویژگی‌های خاک است، که در طول زمان پایدار و قابل پیش‌بینی بوده و مرتبط با عملکرد محصول می‌باشند (Scheppers et al., 2004). از منابع مختلف داده‌ای مانند توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای، هدایت الکتریکی خاک، نقشه عملکرد محصول و داده‌های بررسی خاک جهت تعیین MZs استفاده شده است. که می‌توان به تعیین MZs برپایه عملکرد محصول (Hornung et al., 2006)، اطلاعات خاکی، از جمله حاصلخیزی خاک (Ortega & Santibanez, 2007)، هدایت الکتریکی خاک (Taylor et al., 2006)، بررسی نقشه‌های خاک و توپوگرافی (Reyniers et al., 2006) اشاره نمود. در پنج مزرعه نمایشی تولید گندم در آرژانتین، Peralta and Costa (2013)، نتیجه گرفتند که تعیین نواحی مدیریتی باعث افزایش کارایی استفاده از کودهای پایه ازت در سه مورد از پنج مورد مزارع مورد ارزیابی گردید که اجازه کاربرد کودهای ازته در نرخ‌های متغیر را می‌دهد.

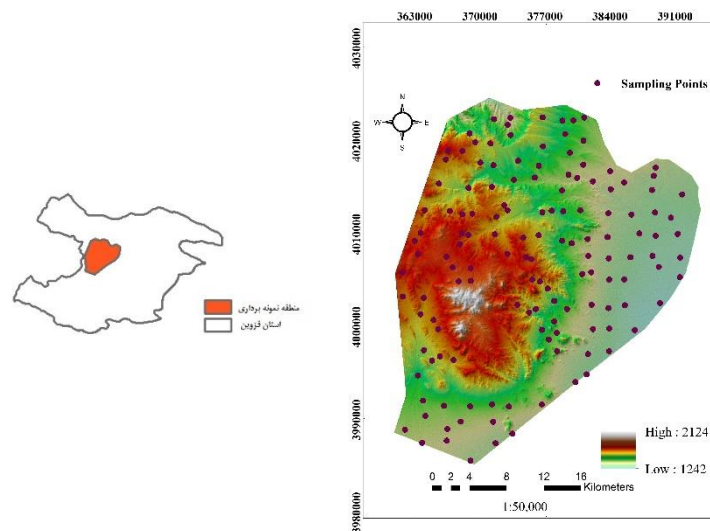
طبق الگوی زمین آماری، هر ویژگی مرتبط با خاک یا محصول به‌عنوان یک متغیر منطقه‌ای تصادفی در نظر گرفته می‌شود، که پیوسته متغیر بوده و تغییرات جغرافیایی تدریجی آن با یک تابع کوواریانس مکانی تشریح می‌گردد. در برنامه‌های کاربردی زمین آماری، کلاس‌بندی ویژگی‌ها غیرضروری است، با این وجود در کشاورزی دقیق تقسیم مزرعه در تعداد محدودی منطقه مدیریت ممکن است، منطقی باشد (Aggelopoulou et al., 2013). بنابراین، الگوریتم‌های خوشه‌ای به‌طور معمول جهت تعیین MZs به کار برده می‌شوند. اطلاعات این الگوریتم‌ها از روش‌های مختلف مانند نقشه‌های توپوگرافی (Carr et al., 1991)، نمونه‌برداری خاک (Johnson et al., 2003)، تجزیه و تحلیل نقشه‌های عملکرد با توجه به داده‌های فصول مختلف (Pedroso et al., 2010) و یا ترکیبی از روش‌های اخیر بدست می‌آید. Valente et al. (2012)، با ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و استفاده از زمین‌آمار در ترکیب با خوشه‌بندی c-means اقدام به تعیین MZs قهوه نمودند و عقیده دارند که بیش از یک ویژگی خاک برای تعیین MZs باید مورد استفاده قرار گیرد.

شناخت تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک به منظور شناسایی علل اساسی تغییرپذیری عملکرد محصول و اجرای مدیریت صحیح برای دستیابی به تولید بیشتر و مدیریت پایدار اراضی امری ضروری است. در این راستا استفاده از تکنیک زمین‌آمار در ترکیب با روش‌های خوشه‌بندی فازی و استفاده از ویژگی‌های خاکی و داده‌های دورسنجی می‌تواند در شناسایی تغییرپذیری عملکرد محصول و تعیین نواحی مدیریتی به منظور دستیابی به اصول کشاورزی پایدار و دقیق به کار گرفته شود. از سوی دیگر میزان عملکرد محصول، بسته به محل قرارگیری بر عوارض زمینی^۳ متغیر خواهد بود. در همین راستا تفکیک MZs که اطلاعات پایه جهت مدیریت ویژه مکانی را در اراضی مورد مطالعه فراهم می‌آورد، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این پژوهش، هدف پاسخ به این سؤال است: چگونه می‌توان بهره‌وری کشت گندم را بهبود بخشید؟ برای حل این مسئله، اقدام به ایجاد نواحی مدیریتی در منطقه قزوین با استفاده از ویژگی‌های خاکی و شاخص‌های زمین‌نما و داده‌های طیفی تاثیرگذار بر کشت گندم و اعمال مدیریت بهینه گردید. هدف از این مطالعه تعیین MZs با تلفیق اطلاعات حاصل از شاخص‌های زمین‌نما و داده‌های طیفی در مزارع گندم دشت قزوین و ارزیابی تغییرات مکانی تولید گندم دریم تحت تاثیر توپوگرافی و ویژگی‌های خاک می‌باشد.

مواد و روش

موقعیت و وسعت منطقه نمونه برداری

در تحقیق حاضر ۱۴۰ نمونه خاک (۰-۳۰ سانتی‌متر) به صورت تصادفی با هدف نمونه‌برداری از مزارع کشت گندم دیم در بخشی از منطقه قزوین برداشت شد هم‌چنین هدف این مطالعه نمونه‌برداری از مزارع کشت گندم دیم بود. منطقه مورد مطالعه به وسعت ۱۰۰ کیلومتر مربع در محدوده عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}00'$ و $36^{\circ}59'$ شرقی قرار دارد (شکل ۱). ارتفاع نقاط نمونه‌برداری مزارع گندم دیم در محدوده ۱۸۱۳-۱۳۶۳ متر واقع شده بود. درصد شیب در نقاط نمونه‌برداری از کمتر از ۱ درصد تا بیش از ۱۷ درصد متغیر بود. آب و هوای منطقه در دسته بندی نیمه خشک قرار می‌گیرد. اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک میانی و متوسط بارش سالیانه ۳۵۰-۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. خاک‌های منطقه به ترتیب در رژیم‌های حرارتی ترمیک^۱ و سه رژیم رطوبتی اریدیک^۲ ضعیف، زیریک خشک و آکوئیک هستند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰). مهمترین سطوح ژئومورفیک منطقه شامل کوهستان، تپه، دشت دامنه‌ای و دشت می‌باشد (Mousavi et al., 2017).



شکل ۱. محدوده منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری بر روی نقشه DEM

اندازه‌گیری آزمایشگاهی و صحرایی

نمونه‌های خاک براساس روش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک آماده و به آزمایشگاه منتقل شد. رطوبت خاک در آزمایشگاه به صورت وزنی (Gardner et al., 1986)، تعیین توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee & Bauder., 1986)، کربن آلی به روش واکلی بلک (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم خاک به روش تیتراسیون برگشتی (Sims, 1996)، فسفر قابل استفاده به روش بی‌کربنات سدیم (Olsen, 1982)، ازت کل به روش کجدال (Nelson and sommer., 1996) و پتاسیم قابل استفاده خاک به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Nelson & Heidel., 1952) بدست آمدند. در زمان برداشت محصول از ۱۴۰ مزرعه در منطقه مورد مطالعه، قطعه‌ای به وسعت یک متر مربع به مرکزیت محل‌های نمونه‌برداری خاک انتخاب شده و بوته‌ها از محل اتصال به خاک کف‌بر و برداشت شد. عملکرد گندم دیم بعد از اندازه‌گیری وزن تر و اندازه‌گیری وزن کاه و کلش به همراه دانه بعد از قراردادن در آن به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه تعیین شد.

تهیه داده‌های محیطی

تهیه نقشه‌های داده‌های محیطی موردنیاز در این پژوهش شامل داده‌ها و شاخص‌های مربوط به توپوگرافی می‌باشند. برای تهیه ویژگی‌ها و شاخص‌های مرتبط با مدل رقومی ارتفاع^۳ (DEM)، با استفاده از نقشه‌های ناهمواری توپوگرافی منطقه مطالعاتی (به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰)

1 Thermic

2 Aridic

3. Digital Elevation Model

تصحیح‌های لازم بر مدل رقومی ارتفاع تهیه شده (با اندازه پیکسلی و دقت ارتفاعی ۳۰ متر) انجام گرفت. تصحیح‌های مزبور شامل پرکردن تورفتگی^۱، درون‌یابی^۲ و بهینه‌سازی مدل رقومی ارتفاع بودند، در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.5 صورت گرفت. سپس در محیط SAGA GIS 7.8.2 نقشه ویژگی‌های اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع تهیه شدند. ویژگی‌ها شامل ارتفاع^۳، درصد شیب^۴، جهت شیب^۵، فاکتور طول و شدت شیب^۶ بودند. شاخص خیسی توپوگرافی^۷ با استفاده از DEM طبق رابطه زیر و در نرم افزار SAGA-GIS محاسبه گردید.

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan b}\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن A_s ، سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز) و b : درجه شیب می‌باشد. شاخص ناهمواری زمین^۸ در نرم‌افزار ArcGIS و بر پایه DEM با دقت ۳۰ متر از طریق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$TRI = \sqrt{\prod_{p=1}^8 ZMd} \quad \text{رابطه (۲)}$$

P تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل اطراف هر پیکسل می‌باشد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها و تصاویر ماهواره لندست ۸

در این تحقیق جهت بدست آوردن شاخص حرارتی از تصاویر سنجنده لندست-۸ مطابق زمان‌های نمونه‌برداری (اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۰) استفاده شده است. پیش پردازش تصویر ماهواره لندست-۸ نیز برای باند حرارتی با اعمال تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری با تبدیل عدد رقومی تصویر به تابندگی سطح و سپس تبدیل تابندگی سطح به دمای ظاهری مطابق با روش (2016) and Jovanovska and Avdan در محیط سامانه متن باز Google Earth Engine انجام گردید. چگونگی محاسبه دمای سطح خاک از باند حرارتی لندست-۸ در روابط ۳ تا ۵ نمایش داده شده است.

$$L_i = M_L \cdot Q_{cal} + A_L - O_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$BT = \frac{K_2}{\ln(K_1 / L_i) + 1} - 273.15 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$LST = \frac{BT}{\{1 + (BT / r) \ln e_i\}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه L_λ رادیانس طیفی بالای اتمسفر، M_L ضریب کسب باند مربوطه، Q_{cal} عدد رقومی باند ۱۰ تصویر لندست-۸، A_L ضریب بایاس باند ۱۰ و O_i ضریب تصحیح برای باند ۱۰ تصویر می‌باشد. این اطلاعات در فایل هدر تصویر موجود است. همچنین BT ضرایب ثابت، $\rho \approx 1.438 \times 10^{-2} \text{mk}$ و ϵ_λ ضریب گسیل است. با استفاده از شاخص حرارتی می‌توان شاخص رطوبتی خاک (SMI) را طبق رابطه زیر بدست آورد:

$$LST_{max} = a_1 \cdot NDVI + b_1 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$LST_{min} = a_2 \cdot NDVI + b_2 \quad \text{رابطه (۷)}$$

a_2 ، b_1 و b_2 با استفاده از رگرسیون خطی که بیان‌کننده داده‌های گرما و سرما می‌باشند بدست آمد. LST_{min} و LST_{max} بیان‌کننده شاخص حرارتی حداکثر و حداقل می‌باشند.

$$SMI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

شاخص‌های طیفی با استفاده از نرم افزار SNAP8 محاسبه شدند و در نرم افزار ArcMap 10.5 برای خروجی داده‌ها استفاده شدند.

- 1 Fill Sink
- 2 Interpolation
3. Elevation
4. Slope Percent
5. Aspect Degree
6. LS Factor
7. Topography wetness index
- 8 . Topography Roughness Index

آنالیزهای آماری، زمین‌آماري، تجزیه به مولفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه‌بندی فازی

جهت بررسی وضعیت توزیع داده‌ها، برخی اطلاعات آماری توسط نرم‌افزار SPSS 26 مورد بررسی قرار گرفت. نرمال بودن داده‌ها توسط آزمون کومولو-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب همبستگی پیرسون، برای بررسی ارتباط ویژگی‌های به کار رفته در این مطالعه محاسبه گردید. جهت ارزیابی الگوی توزیع مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و شاخص‌های توپوگرافی و شاخص‌های طیفی از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده گردید و نیم‌تغییرنماها^۱ برای هر ویژگی به کار رفته در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار GS⁺ و طبق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{a=1}^{N(h)} Z(X_a + h)^2 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که $\gamma(h)$ ، $N(h)$ ، $Z(X_a+h)$ به ترتیب نشان‌دهنده نیم‌تغییرنما در هر فاصله جداکننده^۲ h ، تعداد جفت نمونه‌های جداشده توسط h مقدار اندازه‌گیری شده در a^{th} محل نمونه‌برداری و مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه $a+h^{\text{th}}$ می‌باشند. مدل‌های نیم‌تغییرنما مانند مدل‌های دایره‌ای، کروی، نمایی و گوسی برای تعیین بهترین برازش بر هر ویژگی مورد استفاده در مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت.

نقشه درون‌یابی مقادیر تخمینی ویژگی‌های به کار رفته در مطالعه در مناطق نمونه‌برداری نشده با استفاده از روش کریجینگ معمولی^۳ (OK) بدست آمد. بهترین تخمین‌گر غیرتحلیلی^۴ در نمونه‌برداری‌های تصادفی در مناطق نمونه‌برداری نشده است. مزیت دیگر این روش کاهش تاثیر نقاط نامعمول^۵ است (Triantafilis et al., 2001). تجزیه و تحلیل به مولفه‌های اصلی^۶ (PCA) یک تحلیل چندمتغیره است که تولید متغیرهای متعامد^۷ جدیدی به نام اجزا اصلی (PCs) از مجموعه داده به کار رفته با استفاده از تبدیلات ارتوگونال می‌نماید. از میان PCs ایجادشده عامل‌هایی که دارای واریانس بزرگ‌تر از یک هستند، جهت تعیین MZs مورد استفاده قرار گرفتند. در این مطالعه از الگوریتم فازی میان مرکز-کا^۸ جهت تقسیم اراضی به ۲ تا ۷ خوشه استفاده شد (Minasny & McBratney., 2007). در هر خوشه عضویت با استفاده از فرایند تکرار^۹ بررسی گردید، که با ایجاد یک مجموعه تصادفی از میانگین هر خوشه آغاز می‌گردد. هر مشاهده به نزدیک‌ترین این میانگین‌ها اختصاص داده می‌شود. سپس میانگین‌های جدیدی برای هر خوشه برپایه فاصله آن مشاهده از میانگین خوشه تعریف می‌گردد. بر پایه فرضیه واریانس مساوی و وابستگی آماری، از فاصله هندسی اقلیدسی برای محاسبه فاصله نقطه داده‌ها تا نقطه مرکز خوشه‌ها استفاده شد. نرم‌افزار FuzME جهت خوشه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. روند کار بدین صورت بود که منطقه مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار به دو تا هفت خوشه تقسیم شد (با تنظیمات حداکثر تکرار^{۱۰} = ۳۰۰، حداقل ناحیه^{۱۱} = ۲، حداکثر زون^{۱۲} = ۷، معیار توقف^{۱۳} = ۰،۰۰۰۱ و توان فازی^{۱۴} = ۱،۵). شاخص عملکرد فازی (FPI)^{۱۵} و آنتروپی طبقه‌بندی نرمال‌شده (NCE)^{۱۶} جهت ارزیابی تعداد بهینه MZs مورد استفاده قرار خواهند گرفت. FPI جهت تخمین درجه فازی و NCE جهت اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی ایجادشده توسط طبقات خاص به کار برده می‌شود. تعداد خوشه‌های بهینه براساس حداقل مقادیر FPI و NCE بدست خواهد آمد. تفاوت میان MZs با آزمون واریانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Behera and Shukla, 2015).

$$FPI = 1 - \frac{c}{c-1} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^2}{n} \right] \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

1. Semi-Variogram
2. Lag Distance
3. Ordinary Kriging
4. Unbiased predictor
5. Outlier
6. Principle component Analysis
7. Orthogonal
8. Fuzzy K-mean
9. Iterative Process
10. Max Iteration
11. Min Zone
12. Max Zone
13. Stopping Criterion
14. Fuzziness Exponent
15. Fuzziness performance index
16. Normalized classification entropy

$$NCE = \frac{n}{n-c} \left[\frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \mu_{ik} \log_a(\mu_{ik})}{n} \right] \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که c نشان‌دهنده تعداد خوشه‌ها، n تعداد مشاهدات، μ_{ik} عضویت فازی می‌باشند. مقدار FPI در دامنه صفر تا یک است. مقادیر نزدیک به صفر بیان‌کننده کلاس‌هایی است که درجه اشتراک اعضاء در بین آن‌ها کم است؛ درحالی که مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده کلاس‌هایی است که درجه اشتراک زیاد است و مجزا از یکدیگر نیستند. شاخص NCE تخمینی از میزان ساختار گریزی^۱ ایجاد شده به وسیله یک تعداد کلاس مشخص است. حداقل مقدار شاخص‌های FPI و NCE نشان‌دهنده تعداد بهینه خوشه‌ها است (Fridgen et al., 2004)، که بیان‌کننده حداقل میزان مشارکت عضوها بین کلاس‌ها و بیشترین ساختار در نتیجه فرایند خوشه‌بندی است.

بحث و نتایج

توصیف آماری

این بخش از مطالعه بر روی ۱۴۰ نمونه خاک برداشت‌شده از مزارع گندم دیم صورت گرفته است. توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، شاخص‌های توپوگرافی و طیفی برای مجموعه داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. عملکرد، توپوگرافی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، شاخص‌های طیفی ویژگی‌های گیاه می‌توانند در تعیین نواحی مدیریتی مورد استفاده قرار گیرند (Aggelopoulou et al., 2013). هدف از انجام این مطالعه انتخاب روش‌های کارآمد و مقرون به صرفه برای مدیریت مزارع به منظور به حداکثر رساندن بازده اقتصادی، به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی، و بهبود مدیریت خاص خاک و محصول مورد نظر بود. استفاده از شاخص‌های توپوگرافی و طیفی روشی مقرون به صرفه در جهت تعیین نواحی مدیریتی کشت است (Zerraatpishe et al., 2020). مطالعات انجام‌شده در منطقه کارآمدی استفاده از شاخص‌های توپوگرافی و طیفی را تایید می‌نمایند. در مطالعه‌ای موسوی و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از شاخص‌های طیفی و توپوگرافی اقدام به مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی کلاس خاک در بخشی از اراضی دشت قزوین نمودند. همچنین موسوی و همکاران (۱۴۰۰) از شاخص‌های طیفی، توپوگرافی و لایه‌های اقلیمی جهت مدل‌سازی رقومی تغییرات سه بعدی شوری خاک در اراضی دشت قزوین استفاده نمودند.

جدول ۱. ویژگی‌های آماری شاخص‌های توپوگرافی و طیفی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

متغیرها	مخفف	میانگین	انحراف استاندارد	حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات
شن (درصد)	Sand	۳۴/۶۸	۱۳/۱۶	۵/۳۴	۷۳/۴۸	۳۷/۹۶
رس (درصد)	Clay	۲۸/۸۰	۶/۸۶	۱۲/۶۹	۴۸/۸۵	۲۳/۸۳
کربنات کلسیم (درصد)	CaCO ₃	۱۶/۰۴	۱۱/۴۰	۰/۳۰	۵۸/۲۰	۷۱/۰۸
محتوای ماده آلی (درصد)	OM	۱/۳۲	۱/۰۶	۰/۱۳	۶/۹۸	۸۰/۹۴
جرم مخصوص ظاهری (gr cm ⁻³)	BD	۱/۲۳	۰/۱۰	۱/۰۱	۱/۷۴	۷/۸۹
رطوبت خاک (gr gr ⁻¹)	SM	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۲۵	۱۶/۱۴
ازت کل (mg kg ⁻¹)	N	۶۴۸	۲۰۳	۲۵۶	۱۴۵۴	۳۱/۲۷
فسفر قابل استفاده (mg kg ⁻¹)	P	۸/۱۷	۳/۵۶	۲/۶۸	۲۳/۱۵	۴۲/۵۶
پتاسیم قابل استفاده (mg kg ⁻¹)	K	۳۷۳	۱۱۸	۱۵۶	۷۳۲	۳۱/۵۲
فاکتور طول شیب	LS	۰/۹۰	۱/۰۷	۰/۰۰	۵/۳۶	۱۱۹
جهت شیب (درجه)	Aspect	۱۶۶	۹۴	۱۸/۴۳	۳۶۰	۵۶/۳۷
شیب (درصد)	Slope	۳/۹۵	۲/۹۸	۱/۰۲	۱۷/۹۲	۷۵/۴۶
ارتفاع (متر)	Elevation	۱۴۷۶	۱۴۹	۱۲۵۲	۱۸۷۵	۱۰/۰۷
شاخص خیس توپوگرافی	TWI	۸/۹۵	۲/۷۰	۵/۳۳	۱۷/۰۵	۳۰/۱۶
شاخص رطوبتی خاک	SMI	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۵۸	۳۲/۸۵
شاخص حرارتی خاک	LST	۴۴/۷۰	۲/۹۶	۳۷/۸۴	۵۰/۸۴	۶/۶۲
شاخص ناهمواری زمین	TRI	۱/۴۲	۰/۹۸	۰/۴۵	۶/۲۶	۶۸/۸۴

ویژگی‌های آماری برای ویژگی‌های به کار رفته جهت تعیین MZs در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است. مواد آلی کم، عناصر غذایی کم، محتوای رطوبت خاک پایین و کربنات کلسیم بالا از ویژگی‌های غالب خاک در مزارع گندم دیم منطقه مورد مطالعه است. میانگین کربنات کلسیم بالاتر از ۱۵٪ نشان می‌دهد که مقادیر کلسیم خاک بزرگترین چالش در خاک‌های مورد مطالعه بود. دامنه تغییرات کربنات کلسیم در خاک‌های مورد مطالعه از ۵۸/۲۰-۰/۳۰ درصد متغیر می‌باشد. انحراف استاندارد ۱۱/۴۰ و ضریب تغییرات ۷۱/۰۸ درصد بر تنوع وسیع کربنات کلسیم در مزارع کشت گندم دیم در منطقه مورد مطالعه تاکید دارد. زمانی که تغییرپذیری متغیرهای ورودی و خروجی بالا باشد، قابلیت تعمیم‌پذیری مدل افزایش می‌یابد. و زمانی که تغییرپذیری کم باشد، توانایی آن برای تعمیم کاهش می‌یابد. ضریب تغییرات یک پارامتر بدون بعد بوده و می‌تواند پراکندگی نسبی داده‌ها را نسبت به میانگین نشان می‌دهد (Peng et al., 2004). براساس مطالعات انجام شده ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ درصد به عنوان تغییرات کم، ضریب تغییرات از ۱۵-۳۵ درصد به عنوان تغییرات متوسط، ضریب تغییرات از ۳۵-۷۵ درصد به عنوان تغییرات زیاد و ضریب تغییرات از ۷۵-۱۵۰ درصد به عنوان تغییرات خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌گردد (Carter and Gregorich., 2007). بیشترین و کمترین مقدار ضریب تغییرات مربوط به LS و LST می‌باشد، سایر ویژگی‌ها دارای ضریب تغییرات متوسط تا زیاد (به استثنای BD و ارتفاع که دارای ضریب تغییرات کم) می‌باشند (جدول ۱). ضریب تغییرات رطوبت خاک برابر با ۱۶ درصد است، که به عنوان ضریب تغییرات متوسط در نظر گرفته می‌شود. رطوبت خاک ارتباط نزدیکی با بافت خاک دارد. در منطقه مورد مطالعه بافت غالب رسی لومی است، که به طور کلی مواد مغذی، رطوبت و ماده آلی بیشتری نسبت به خاک‌های شنی دارد، و نسبت به خاک‌های غنی از سیلت، زهکشی و نفوذ آب و هوای بهتری دارند و به مراتب از خاک‌های رسی راحت تر شخم زده می‌شوند (Liu et al., 2021). میانگین محتوای رس و شن خاک و جرم مخصوص ظاهری با توجه به جدول ۱ به ترتیب برابر با ۲۸/۸۰ درصد، ۳۴/۶۸ درصد و ۱/۲۳ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. میانگین نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل استفاده موجود در خاک به ترتیب برابر ۶۴۸، ۸/۱۷ و ۳۷۳ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد. ازت و فسفر قابل استفاده موجود در اکثر نقاط منطقه مورد مطالعه بسیار کم بود. که این امر به این دلیل است که مقدار مصرف کود توسط کشاورزان در منطقه مورد مطالعه بسیار کم بود (در برخی مناطق کود مصرف نشده بود). ضریب تغییرات ماده آلی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۸۴/۹۴ بود که نشان دهنده تغییرات زیاد در مقادیر ماده آلی در نقاط مختلف می‌باشد. میانگین ماده آلی نشان دهنده مقادیر پایین محتوای ماده آلی خاک در بیشتر نقاط نمونه برداری می‌باشد. مطالعه (Tripathi et al., 2015) دلیل پایین بودن مقادیر ماده آلی را مرتبط با عدم مصرف کود حیوانی و همچنین عدم باقی نگذاشتن بقایای گیاهی در مزرعه می‌دانند. بررسی ویژگی‌های آماری متغیرهای به کار رفته در مطالعه بیان کننده تغییرات ویژگی‌های خاک از کم تا خیلی زیاد است. در بین ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی و طیفی، طول شیب با ضریب تغییرات ۱۱۵٪، ضریب تغییرات و LST و ارتفاع دارای کمترین مقدار بودند (جدول ۱). سایر ویژگی‌های دارای تغییرات متوسط تا زیاد بودند. طول شیب می‌تواند برای شناسایی مناطق با خطر فرسایش بالا یا بهره‌وری پایین استفاده گردد. شیب، جهت شیب و ارتفاع همگی می‌توانند بر توزیع مواد مغذی، محتوای ماده آلی خاک، دمای خاک و محتوای رطوبت خاک تأثیر گذارند که به نوبه خود بر بهره‌وری محصول تحت تأثیر قرار می‌دهند (Agyeman et al., 2022). با تجزیه و تحلیل آمار توصیفی برای ویژگی‌های توپوگرافی، محققان و مدیران زمین می‌توانند بینشی در مورد ویژگی‌های زمین یک منطقه و چگونگی تأثیر آن بر جنبه‌های مختلف مدیریت کشت و استفاده از منابع به دست آورند.

مقادیر ضریب همبستگی پیرسون نشان دهنده رابطه بین ویژگی‌های خاک است (جدول ۲ و ۳). فرض بر این است که ویژگی‌های خاک که همبستگی مثبت و منفی را نشان می‌دهند به ترتیب دارای الگوی توزیع مکانی مشابه و مخالف هستند (Behera et al., 2018). جدول ۲ و ۳ نشان می‌دهند که تقریباً بیشتر متغیرها به جز تعدادی با یکدیگر همبستگی معناداری داشتند. بالاترین همبستگی مثبت بین جرم مخصوص ظاهری و OM ($r=0.99$)، بین محتوای رطوبت خاک و SMI ($r=0.57$)، بین LS factor و TRI ($r=0.89$)، بین جهت شیب و TRI ($r=0.89$) مشاهده شد (معنی‌داری در سطح ۱٪). بالاترین همبستگی منفی بین شن و رس ($r=-0.76$) مشاهده شد. سایر همبستگی‌های منفی همگی ضعیف بودند (معنی‌داری در سطح ۱٪). همبستگی مثبت بین BD و OM و همچنین

به طور کلی، تجزیه و تحلیل همبستگی انجام شده در این مطالعه بینش‌هایی را در مورد روابط بین ویژگی‌های به کار رفته و عملکرد گندم دیم ارائه کرد و به شناسایی الگوها در ویژگی‌های خاک مناطق کشت گندم دیم کمک کرد. با درک روابط بین عملکرد گندم دیم و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و ویژگی‌های توپوگرافی، این امکان فراهم می‌شود در مناطق مدیریت دقیق‌تر و منسجم‌تری را بر اساس شباهت‌ها در داده‌های توپوگرافی ایجاد کرد.

جدول ۲. ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم دیم

متغیر	عملکرد	درصد شن	درصد رس	کربنات کلسیم	ماده آلی	جرم مخصوص ظاهری	رطوبت خاک	ازت کل	فسفر قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده
عملکرد	۱									
درصد شن	۰/۱۸۲*	۱								
درصد رس	۰/۱۷۳*	۰/۷۵۹**	۱							
کربنات کلسیم	۰/۱۸۶*	۰/۲۸۷**	۰/۱۸۰*	۱						
ماده آلی	۰/۲۲۱**	۰/۲۰۱*	۰/۲۸۶**	۰/۰۶۹	۱					
جرم مخصوص ظاهری	۰/۲۲۴**	۰/۱۹۷*	۰/۲۷۰**	۰/۰۸۶	۰/۹۹۴**	۱				
رطوبت خاک	۰/۲۰۹*	۰/۳۳۶**	۰/۵۴۵**	۰/۱۴۰	۰/۳۸۹**	۰/۳۷۳**	۱			
ازت کل	۰/۱۶۴	۰/۱۶۱	۰/۱۳۶	۰/۰۶۳	۰/۰۳۹	۰/۰۳۲	۰/۲۲۸**	۱		
فسفر قابل استفاده	۰/۳۳۷**	۰/۰۵۴	۰/۱۴۳	۰/۰۲۲	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۵۹	۰/۴۱۳**	۱	
پتاسیم قابل استفاده	۰/۱۴۱	۰/۰۵۰	۰/۰۳۸	۰/۵۱۵**	۰/۰۰۶	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۲۲۴**	۰/۰۵۶	۱

جدول ۳. ضرایب همبستگی بین ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی و عملکرد گندم دیم

متغیر	عملکرد	فاکتور طول شیب	شیب	جهت شیب	ارتفاع	شاخص خیسی توپوگرافی	رطوبت خاک	شاخص حرارتی خاک	شاخص ناهمواری زمین
عملکرد	۱								
فاکتور طول شیب	۰/۳۹۱**	۱							
شیب	۰/۳۰۸**	۰/۷۸۴**	۱						
جهت شیب	۰/۰۲۳	۰/۰۶۹	۰/۱۳۵	۱					
ارتفاع	۰/۴۶۲**	۰/۳۹۶**	۰/۳۹۶**	۰/۰۹۷	۱				
شاخص خیسی توپوگرافی	۰/۰۶۹	۰/۱۸۴*	۰/۴۰۳**	۰/۰۲۸	۰/۱۰۱	۱			
شاخص رطوبت خاک	۰/۳۸۲**	۱/۱۶۰	۰/۱۷۳*	۰/۰۷۶	۰/۱۱۱	۰/۰۱۵	۱		
شاخص حرارتی خاک	۰/۳۸۲**	۰/۱۶۰	۰/۱۷۳*	۰/۰۷۶	۰/۱۱۱	۰/۰۱۵	۰/۹۹**	۱	
شاخص ناهمواری زمین	۰/۳۲۷**	۰/۸۸۴**	۰/۸۹۲**	۰/۰۷۰	۰/۳۶۱**	۰/۳۸۴**	۰/۲۲۸**	۰/۲۲۸**	۱

توزیع مکانی ویژگی‌های به کار رفته در مطالعه

در این مرحله تجزیه و تحلیل مکانی داده‌ها براساس نیم تغییر نما انجام شد. با استفاده از این آنالیز می‌توان همبستگی مکانی داده‌های به کار رفته در این مطالعه را مورد بررسی قرار داد. مشخصات نیم‌تغییرنما ویژگی‌های به کار رفته در این مطالعه در جدول ۴ و شکل ۲ ارائه شده است.

در این مطالعه به استثنای ارتفاع و TWI که از مدل خطی تبعیت نمودند، سایر متغیرها از مدل کروی و در غالب موارد از مدل نمایی تبعیت کرده‌اند (جدول ۴). مدل‌های نمایی و کروی از معمول‌ترین مدل‌ها برای بررسی و مطالعه تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و تخمین کریجینگ در مطالعات علوم خاک هستند (Behera et al., 2018; Vieira & Paz Gonzalez., 2003). مطالعات دیگر نیز برازش مدل کروی و نمایی را بر بسیاری از ویژگی‌های به کار رفته در تعیین MZs نشان می‌دهد (Tripathi et al., 2015). این یافته‌ها مطابق با یافته‌های (Ferreira et al., 2015) می‌باشد که بهترین مدل برازش شده در این مطالعه برای OM، pH، EC و OM، N، P، Ca، Mg را بهتر همچنین (Behera et al., 2018) نیز بیان داشتند که مدل نمایی در مقایسه با سایر مدل‌ها تغییرات مکانی K، P، Ca، Mg را بهتر توصیف می‌کند. آنالیز تغییرنماها نشان‌دهنده تغییرپذیری دامنه تاثیر^۱ متغیرهای مختلف است، به طوری که دامنه تاثیر تغییرنما از ۲۲۹۰ متر برای رس تا ۱۱۶۴۰ متر برای TRI در نوسان است. نکته قابل توجه این است که دامنه تاثیر ویژگی‌های به کار رفته تابعی از فاصله

نمونه‌برداری و مقیاس منطقه مورد مطالعه است (Cambardella et al., 1994). جدول ۴ نشان می‌دهد که کمترین دامنه تاثیر متعلق به رس می‌باشد، که نشان‌دهنده شباهت مکانی و گستردگی مکانی کمتر است. طبق نظر (Kerry and Oliver (2004)، فاصله نمونه‌برداری از خاک باید کمتر از نصف مقدار دامنه نیم‌تغییرنما باشد. بنابراین، مقادیر دامنه به‌دست‌آمده برای ویژگی‌های خاک مورد مطالعه می‌تواند برای هدایت برنامه‌ریزی نمونه‌برداری از خاک آینده در مزارع کشت گندم دیم و سایر محصولات در مناطق مشابه استفاده شود. از این رو فاصله نمونه‌برداری از خاک باید کمتر از مقادیر محدوده ویژگی‌های خاک ثبت‌شده در مطالعه حاضر باشد.

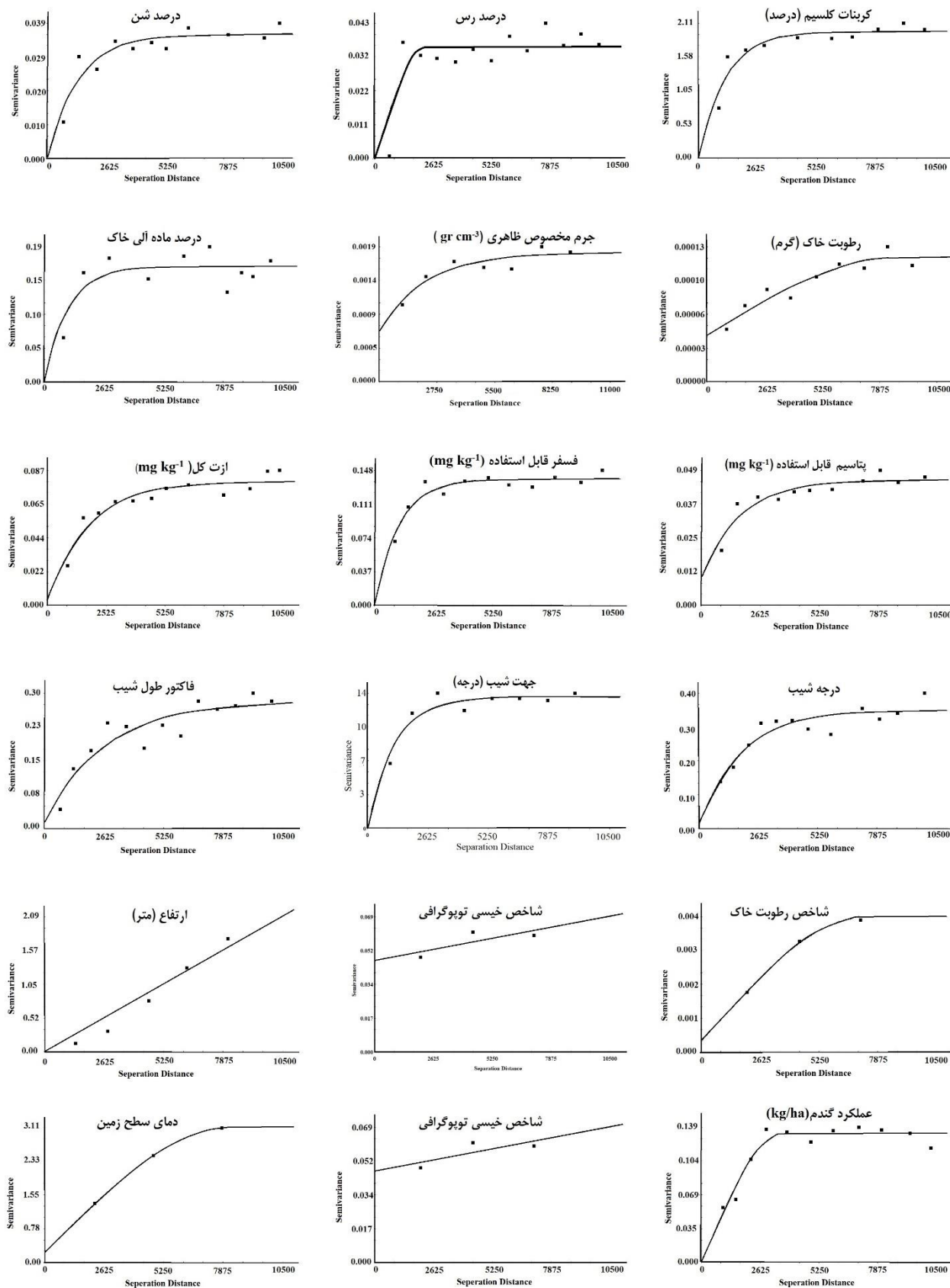
جدول ۴ نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی ویژگی‌های به‌کار رفته می‌باشد. شدت و درجه وابستگی مکانی را میتون با تقسیم اثر قطعه‌ای بر مقدار آستانه بدست آورد، که به‌صورت درصد نیز بیان می‌گردد و دلالت بر سهم واریانس قطعه‌ای از کل تغییرات دارد. اگر این مقدار کمتر از ۲۵ درصد باشد، متغیر وابستگی مکانی قوی، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد وابستگی مکانی متوسط و بیشتر از ۷۵ درصد وابستگی مکانی ضعیف دارد (Cambardella et al., 1994). به استثنای SM، BD و TRI که وابستگی مکانی متوسط و TWI که وابستگی مکانی ضعیف را نشان داد. وابستگی مکانی قوی ویژگی‌های خاک توسط ویژگی‌های ذاتی خاک مانند کانی‌شناسی و بافت خاک کنترل می‌شود، در حالی که عوامل بیرونی مانند مدیریت خاک از جمله خاک‌ورزی و کاربرد کود بر وابستگی مکانی متوسط و ضعیف تاثیرگذار است (Cambardella et al., 1994).

جدول ۴. مولفه‌های مدل نیم‌تغییرنمای برازش‌شده به ویژگی‌های خاک و پارامترهای توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه

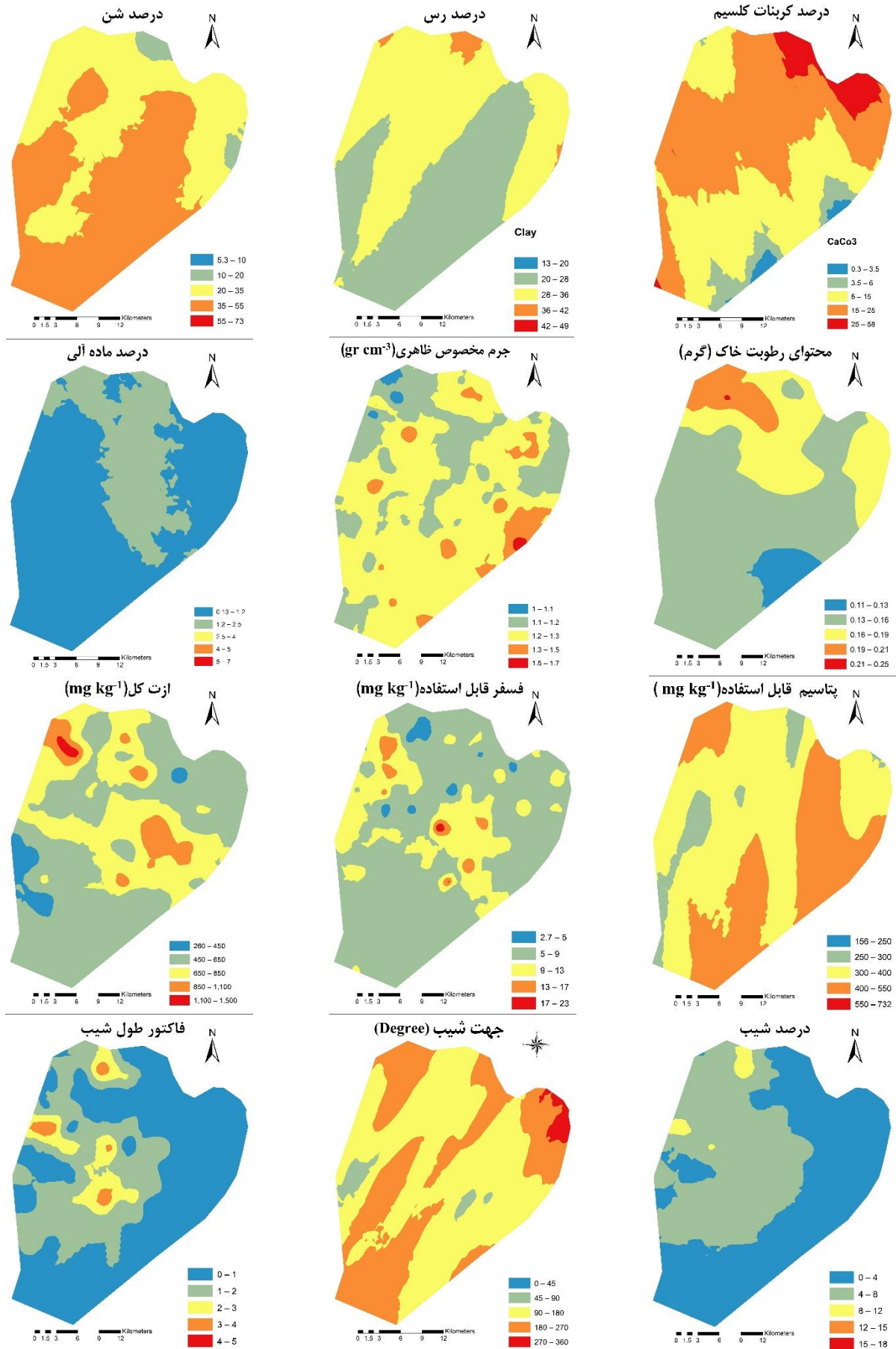
متغیر	مدل	اثر قطعه ای	مقدار آستانه	دامنه تاثیر (m)	همبستگی مکانی	R ²	RSS
جرم مخصوص ظاهری	نمایی	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲	۶۶۶۰	متوسط	۰/۸۴۰	۰/۰۰۰۰
کربنات کلسیم	نمایی	۰/۰۰۱۰	۱/۹۸۱	۳۵۷۰	قوی	۰/۸۵۸	۰/۱۸۵۰
درصد رس	کروی	۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۶	۲۳۹۰	قوی	۰/۶۹۳	۰/۰۰۰۵
رطوبت خاک	کروی	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰	۸۶۹۰	متوسط	۰/۸۹۵	۰/۰۰۰۰
پتاسیم قابل استفاده	نمایی	۰/۰۱۰۱	۰/۴۵۷	۵۲۲۰	قوی	۰/۸۵۸	۰/۰۰۰۱
ازت کل	نمایی	۰/۰۰۰۳	۰/۰۸۰	۵۴۹۰	قوی	۰/۸۸۲	۰/۰۰۰۳
ماده آلی	نمایی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۶۶	۳۰۹۰	قوی	۰/۶۲۲	۰/۰۰۴۸
فسفر قابل استفاده	نمایی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۳۸	۳۱۸۰	قوی	۰/۸۷۸	۰/۰۰۰۶
درصد شن	نمایی	۰/۰۰۰۱	۰/۳۶۰	۴۱۴۰	قوی	۰/۸۳۲	۰/۰۰۰۱
دمای سطح زمین	کروی	۰/۲۳۵۰	۳/۱۰۹	۸۲۹۰	قوی	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰
درصد شیب	نمایی	۰/۰۰۵۰	۰/۳۴۹	۵۵۸۰	قوی	۰/۸۳۳	۰/۰۰۹۹
شاخص رطوبت خاک	کروی	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۴	۷۳۹۰۰	قوی	۰/۹۹۵	۰/۰۰۰۰
شاخص خیزی توپوگرافی	خطی	۰/۰۴۶۴	۰/۰۶۱	۷۱۰۰	ضعیف	۰/۶۰۴	۰/۰۰۰۴
جهت شیب	نمایی	۰/۰۱۰۰	۱۳/۴۹۰	۳۴۵۰	قوی	۰/۸۸۲	۵/۰۶۰۰
ارتفاع	خطی	۰/۰۰۱۰	۲/۰۱۱	۱۰۰۸۰	قوی	۰/۹۸۹	۰/۱۱۳۰
شاخص ناهمواری زمین	نمایی	۰/۱۳۸۹	۰/۳۳۶	۱۱۶۴۰	متوسط	۰/۹۰۲	۰/۰۰۰۹
فاکتور طول شیب	نمایی	۰/۰۱۲۸	۰/۲۸۴	۷۹۸۰	قوی	۰/۸۳۲	۰/۰۱۰۷

پهنه‌بندی و تهیه نقشه کریجینگ

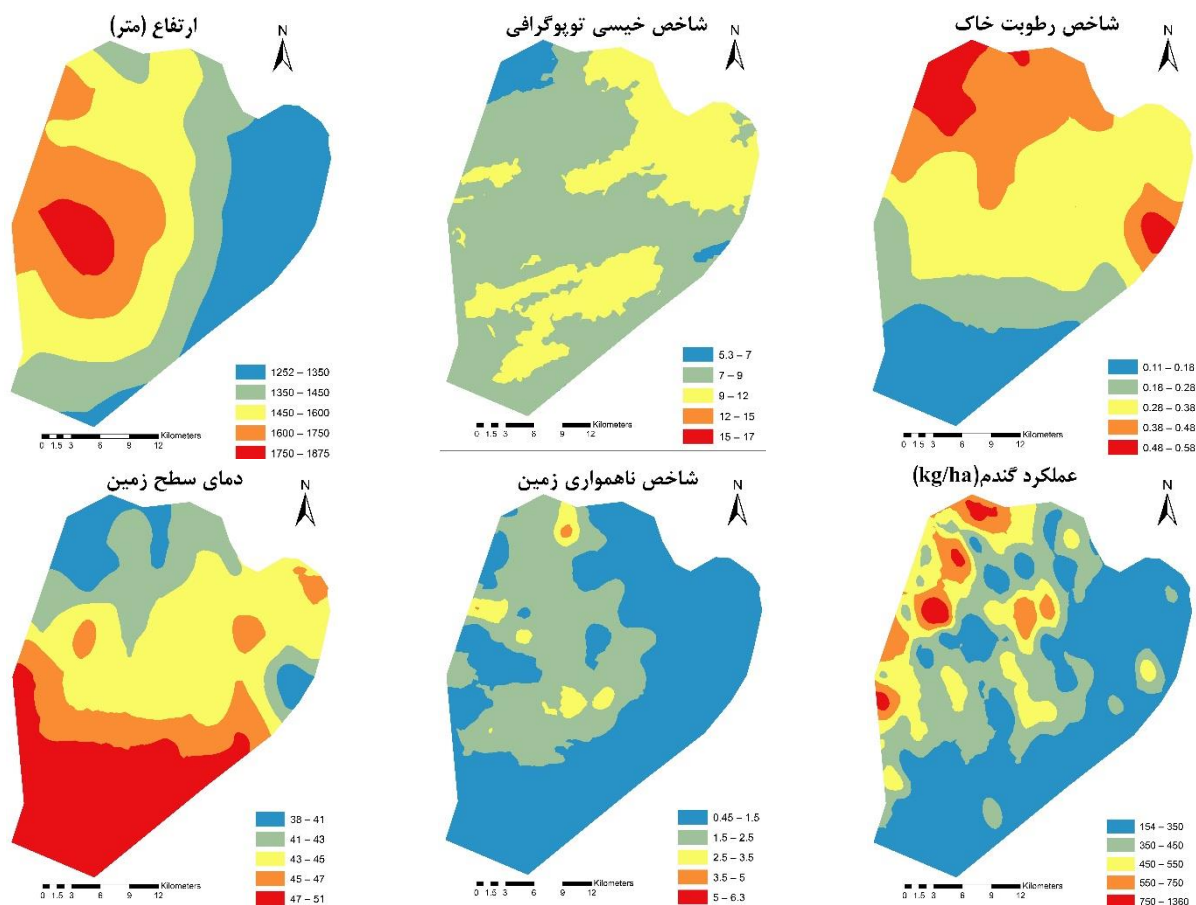
با توجه به مطالعات انجام‌شده (Behera et al., 2018; Tripathi et al., 2015; Karydas et al., 2020)، در این مطالعه از روش کریجینگ معمولی جهت تهیه نقشه‌های توزیع مکانی ویژگی‌های خاکی، توپوگرافی و طیفی استفاده شد. ویژگی‌های مورد مطالعه توزیع متفاوتی در منطقه نشان دادند. نتایج به‌دست آمده ساختارهای مکانی مشابهی را بین مقادیر برآوردشده ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، توپوگرافی و طیفی نشان دادند، که تجزیه همبستگی بین نتایج مقادیر اندازه‌گیری‌شده آن‌ها (جدول ۲ و ۳) نیز تا حدی این موضوع را تایید می‌کند. به‌طوری‌که در نقشه تغییرات مکانی ویژگی‌ها، روند تغییرات (افزایشی و کاهششی) در نواحی با وضعیت مطلوب و نامطلوب به خوبی مشهود است (شکل ۳). ثابت شده است، کریجینگ الگوهای واقع‌گرایانه‌تری تولید می‌کند، درحالی‌که قابلیت دستیابی به دقت‌های بالاتر را در مقیاس‌های مختلف در نقشه‌های خاکی دارد (Reza et al., 2010). علاوه‌براین، شواهدی مبنی بر خودهمبستگی مکانی قویتر در این نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای در روش کریجینگ در مقایسه با روش‌های دیگر مشاهده شده است (Eldeiry & Garcia, 2012).



شکل ۲. نیم تغییرنماهای برازش شده بر متغیرهای به کار رفته در مطالعه.



شکل ۳. نقشه کریجینگ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، پارامترهای توپوگرافی و عملکرد گندم دیم



ادامه شکل ۳. نقشه کریجینگ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، پارامترهای توپوگرافی و عملکرد گندم دیم

شباهت در الگوی توزیع مکانی برخی متغیرها، از ویژگی‌های مهم دیگر در نقشه‌های ایجاد شده است. جهت تعیین میزان همخوانی نقشه‌های کریجینگ هریک از ویژگی‌ها، نقشه‌ها به‌طور بصری^۱ با یکدیگر مقایسه شدند. بررسی نقشه کریجینگ توزیع اندازه ذرات نشان‌دهنده بالاتر بودن درصد رس در مناطق شمال و شمال غربی منطقه و کمتر بودن درصد شن در این مناطق در مقایسه با جنوب و شرق منطقه مطالعاتی است. بررسی نقشه‌های OM و SM نشان داد که OM و SM در مناطق شمال و شمال غربی در مقایسه با سایر مناطق بیشتر است. مطالعات مختلف تاثیر رس خاک بر ظرفیت نگهداری آب و رطوبت را نشان داده‌اند. در مطالعه‌ای که Schepers et al. (2004) انجام دادند، نشان دادند که خاک‌هایی با محتوای رس بالاتر، سطح رطوبت بالاتری دارند و این اثر در خاک سطحی بارزتر است. ماده‌الی نیز جز مهمی از خاک است که می‌تواند بر ساختار خاک، نفوذ آب و در دسترس بودن مواد غذایی تاثیرگذار باشد. Ruehlmann and Korschens (2009) تاثیر مثبت محتوای ماده‌الی را بر رطوبت خاک در مناطق کشاورزی بررسی نمودند. غلظت پایین ازت و فسفر قابل استفاده بیشتر در مناطق جنوبی به سمت شرق و در برخی نواحی شمالی مشاهده شد. غلظت پتاسیم قابل استفاده در مناطق جنوبی و شرقی در مقایسه با سایر نواحی مطالعاتی بیشتر بود. الگوی توزیع مکانی غلظت عناصر را می‌توان به انواع مختلف خاک و اتخاذ شیوه‌های مختلف مدیریت زمین از قبیل کاربرد کود در منطقه مطالعاتی نسبت داد (Bogunovic et al., 2017). نقشه‌های ایجاد شده اطلاعات کمی در مورد محتوای NPK ارائه می‌دهند که می‌تواند برای اجرای توصیه‌های در رابطه با مدیریت کشت در نواحی ویژه مورد استفاده قرار گیرد (Tripathi et al., 2015). به طور کلی در مناطق غرب و شمال غرب که عملکرد گندم بهتر از سایر مناطق است، ویژگی‌های خاکی نیز در شرایط بهتری نسبت به سایر مناطق قرار دارند.

ویژگی‌های توپوگرافی، به طور قابل توجهی بر خواص خاک، از جمله محتوای عناصر خاک، محتوای مواد آلی، بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و محتوای رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد. مقایسه نقشه‌های کریجینگ ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی با نقشه عملکرد گندم دیم نشان می‌دهد در مناطقی که ارتفاع بیشتر است عملکرد نیز بهتر بوده است. ارتفاعات بالاتر عموماً به دلیل افزایش بارندگی و دمای کمتر که نرخ تبخیر و تعرق را کاهش می‌دهد، سطح رطوبت خاک بالاتر و رشد گیاه بهتری دارند. همچنین شیب‌های رو به شمال

تمایل دارند نور مستقیم خورشید کمتری دریافت کنند و رطوبت بیشتری را حفظ کنند، که منجر به محتوای بیشتر مواد آلی و در دسترس بودن مواد غذایی می‌گردد (Jiang & Thelen., 2004). بررسی نقشه عملکرد گندم دیم نشان‌دهنده پایین بودن عملکرد در مزارع کشت گندم دیم در شرق و جنوب منطقه به سمت مرکز منطقه مطالعاتی است. این مناطق مناطقی هستند که مقدار LST بالاتر، SMI کمتر، ارتفاع و شیب نزدیک به صفر، شاخص ناهمواری‌های کمتر و TWI کمتری نسبت به مزارع کشت گندم دیم در نواحی دیگر دارند. به‌طور کلی، این مطالعه اهمیت تجزیه و تحلیل توزیع مکانی را برای درک روابط پیچیده بین ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی و طیفی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان می‌دهد. با شناسایی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک و عوامل محیطی موثر بر ایجاد این تنوع، محققان و مدیران زمین می‌توانند استراتژی‌های حفاظت و مدیریت پایدار خاک هدفمندتر و مؤثرتری را متناسب با مناطق خاص و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها اعمال نمایند.

تجزیه به مولفه‌های اصلی

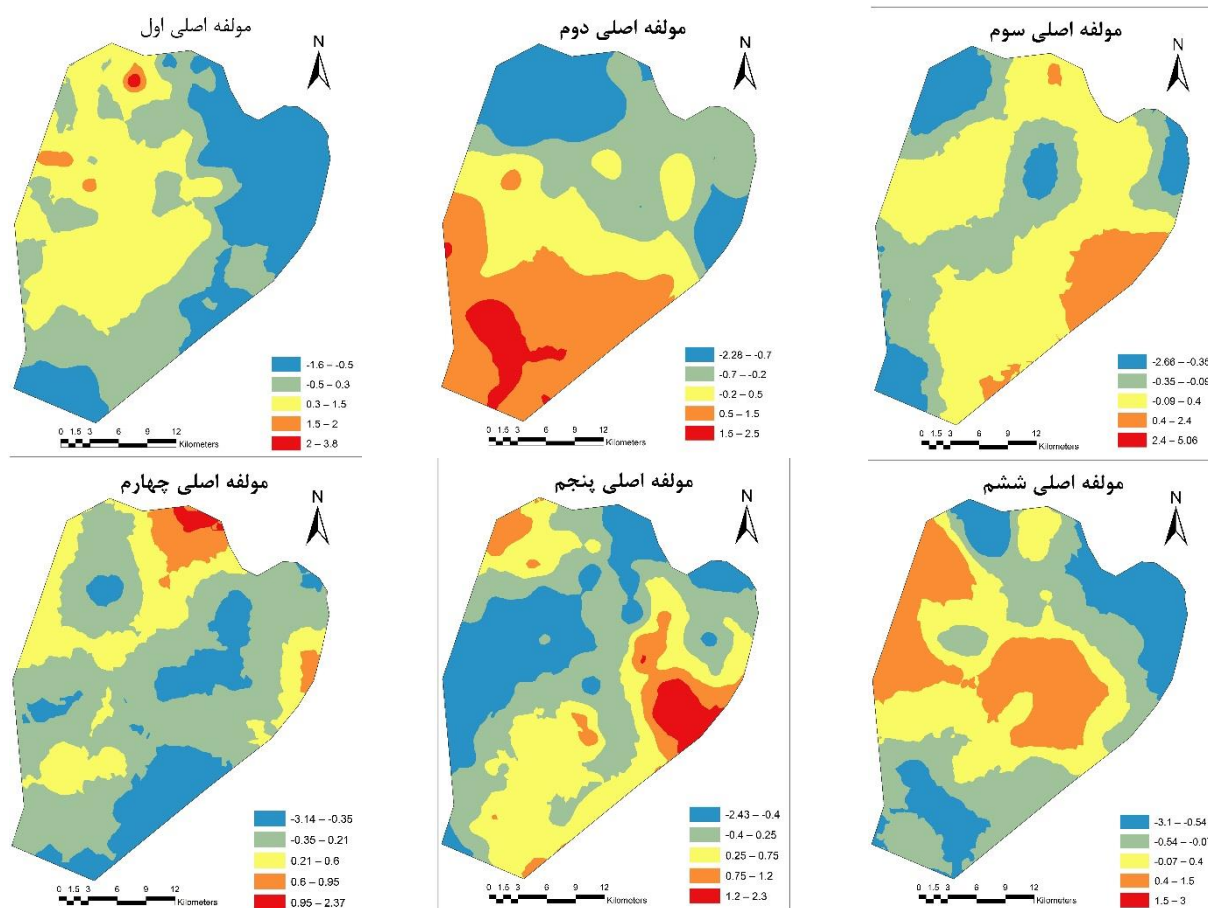
ضریب KMO و آزمون بارتلت شاخص‌هایی هستند که از آن‌ها برای پی بردن به اینکه تجزیه به عامل‌ها مفید است یا نه، استفاده می‌شود. مقدار ضریب KMO و آزمون کرویت بارتلت به ترتیب ۰/۶۵ و ۳۱۳۴ می‌باشد. مقدار آماره بارتلت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و بنابراین تجزیه عامل‌ها مفید است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حجم نمونه جهت انجام تحلیل عاملی کافی بوده و فرض مستقل بودن متغیرها از یکدیگر با آزمون کرویت بارتلت رد می‌گردد. از ارزش مقدار ویژه^۱ به‌عنوان فاکتوری جهت بررسی روابط بین مولفه‌ها و متغیرهای به‌کار برده شده استفاده شد. تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که شش مولفه اول با مقدار ویژه بزرگتر از یک، بیش از ۷۶/۳ درصد واریانس کل را برآورد می‌نمایند (جدول ۵). مقدار ویژه بزرگتر از یک بیان‌کننده آن است که یک مولفه (PC) در مقایسه با یک متغیر انفرادی، واریانس بیشتری را برآورد می‌کند (Sharma, 1996). سایر مولفه‌ها با مقادیر ویژه کمتر از یک، معنی‌داری کمتری داشته و به‌عنوان اشتباه در نظر گرفته شدند؛ که شامل انواع مختلف اشتباه در نمونه‌برداری، جزءهای تصادفی تغییر خاک و تجزیه خواص فیزیکی و شیمیایی خاک هستند. مقدار ویژه کمتر از یک بیان می‌کند که آن عامل نسبت به متغیرهای اولیه واریانس کمتری را نشان می‌دهد (Sharma, 1996).

جدول ۵. مقدار ویژه، سهم هر مولفه، واریانس تجمعی و بار عاملی ویژگی‌های خاک با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی

PC ₆	PC ₅	PC ₄	PC ₃	PC ₂	PC ₁	
۱/۱	۱/۲	۱/۶	۲	۲/۹	۴	ارزش ویژه
۶/۶	۷/۳	۹/۶	۱۲	۱۷/۳	۲۳/۵	درصد واریانس (%)
۷۶/۳	۶۹/۷	۶۲/۴	۵۲/۸	۴۰/۸	۲۳/۵	واریانس تجمعی (%)
Eigenvector						متغیرها
-۰/۰۲	۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۵	-۰/۱۵	۰/۹۵*	شاخص ناهمواری زمین
-۰/۰۴	۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۰۸	۰/۹۳	شیب
-۰/۰۱	-۰/۰۳	۰/۰۲	-۰/۰۷	-۰/۰۵	۰/۸۹	فاکتور طول شیب
۰/۳۳	-۰/۳۶	۰/۱۰	-۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۵۱	ارتفاع
-۰/۰۶	-۰/۱۸	۰/۲۶	-۰/۰۱	۰/۱۰	-۰/۴۶	شاخص خبسی توپوگرافی
-۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۹۳	-۰/۱۱	شاخص رطوبت زمین
-۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۹۳	-۰/۱۱	دمای سطح زمین
-۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۳۴	-۰/۲۳	-۰/۶۳	۰/۱۲	رطوبت خاک
-۰/۰۲	۰/۰۴	-۰/۱۴	۰/۹۶	۰/۰۸	-۰/۱۰	جرم مخصوص ظاهری
-۰/۰۲	۰/۰۲	-۰/۱۵	۰/۹۶	۰/۰۸	-۰/۱۰	ماده آلی
-۰/۰۷	-۰/۰۲	۰/۸۶	-۰/۱۷	-۰/۲۷	۰/۰۴	درصد رس
۰/۰۱	۰/۰۴	-۰/۸۵	۰/۱۰	۰/۲۳	۰/۱۵	درصد شن
۰/۰۷	۰/۸۷	۰/۱۰	-۰/۰۱	-۰/۰۶	-۰/۰۷	پتاسیم قابل استفاده
-۰/۰۴	-۰/۷۹	۰/۱۷	-۰/۰۲	-۰/۲۳	-۰/۱۷	کربنات کلسیم
۰/۸۴	۰/۰۲	-۰/۲۰	-۰/۰۳	-۰/۰۷	-۰/۰۸	فسفر قابل استفاده
۰/۶۷	۰/۰۲۶	۰/۱۱	۰/۰۹	-۰/۴۱	۰/۰۸	ازت کل
-۰/۴۳	۰/۰۹	-۰/۲۳	-۰/۳۸	-۰/۲۸	-۰/۱۸	جهت شیب

* زیرخط دار بودن نشان‌دهنده نقش بیشتر آن ویژگی در هر PC است.

نخستین مولفه اصلی (PC_1)، حدود ۲۳/۵ درصد از کل واریانس را تشریح نمود. که دارای بیشترین بار مثبت با TRI (۰/۹۵) و شیب (۰/۹۳) و به دنبال آن فاکتور طول شیب (۰/۸۹) است. این مولفه همچنین دارای بار عامل‌ها با ارزش متوسط و مثبت با ارتفاع ۰/۵۱- و TWI (۰/۴۶-) است. در مبحث کشاورزی، توپوگرافی یک عامل محدود کننده نسبتاً مهم است، زیرا بسیاری از ویژگی‌های زمین تحت تأثیر توپوگرافی بر عملکرد گندم دیم تأثیر می‌گذارد (Da Silva & Silva, 2008). از ویژگی‌های توپوگرافی که احتمالاً بر عملکرد اثرگذار هستند می‌توان به شیب، ارتفاع و ناهمواری‌های سطح زمین اشاره نمود (Wang et al., 2019). این متغیرها توصیفی از مشخصات زمین و ناهمگونی سطح زمین ارائه می‌دهد. ویژگی‌های توپوگرافی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک دارند و تأثیرات آنها بسته به ویژگی خاص و شرایط محیطی می‌تواند متفاوت باشد. شاخص ناهمواری سطح می‌تواند با تغییر میزان رواناب و نفوذ آب، بر سطح رطوبت خاک تأثیر گذارد. مقادیر بالاتر TRI نشان‌دهنده زمین ناهموارتر است، که می‌تواند جریان آب را کاهش دهد و مقدار آبی را که به خاک نفوذ می‌کند افزایش دهد. که می‌تواند منجر به سطوح بالاتر رطوبت خاک شود (Riley 1999). از طرف دیگر، در مناطقی که کشت دیم انجام می‌شود، ویژگی‌های توپوگرافی می‌توانند در عملکرد محصول تأثیر بسزایی داشته باشند. این به این دلیل است که محصولات دیم به آب باران برای رشد وابسته هستند. ترکیب، شاخص ناهمواری سطح، شیب، و عامل فاکتور شیب به طور کلی بر حرکت آب در سراسر چشم انداز تأثیر می‌گذارد و بر توزیع و حفظ رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد. درک این تعاملات برای کاربردهای مختلف، از جمله کشاورزی، مدیریت منابع آب و حفاظت از محیط زیست بسیار مهم است (Xiang et al., 2017). درک این روابط می‌تواند به کاربرد شیوه‌های مدیریت زمین و بهبود کیفیت خاک و رشد گیاهان در مناطق مختلف کمک کند. مولفه دوم (PC_2)، ۱۷/۳ درصد از کل واریانس را تشریح می‌نماید. این مولفه دارای بیشترین بار عاملی با شاخص رطوبت خاک و دمای سطح زمین (۰/۹۳) و بار عاملی متوسط با محتوای رطوبت خاک (۰/۶۳) است. همبستگی بین SMI و LST با محتوای رطوبت خاک قوی و معنی‌دار است (جدول ۲ و ۳). دمای سطح زمین بر انرژی بین زمین و پوشش گیاهی تأثیرگذار بوده و برای تخمین دمای هوا در سطح زمین مفید است. LST دارای همبستگی ذاتی با پوشش گیاهی و خاک است. رطوبت خاک نیز بر پوشش گیاهی و بازتاب سطح اثرگذار است. رطوبت خاک جز مهمی در توازن آب و انرژی در سطح زمین است؛ که LST و تبخیر و تعرق خاک را تنظیم می‌نماید (Pablos et al., 2016).



شکل ۴. نقشه کربینگ شش مولفه اصلی



در PC_3 جرم مخصوص ظاهری و محتوای ماده آلی دارای بیشترین بار عاملی $0/96$ بودند. این مولفه 12 درصد واریانس کل را تشریح می‌نماید. هر دوی این ویژگی‌ها بر ساختار خاک، نفوذ آب و نگهداری آن و در دسترس بودن مواد غذایی در ارتباط می‌باشند. کمبود ماده آلی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت و در نتیجه کاهش عملکرد محصول گردد. همچنین در خاک‌ها باماده آلی کم و BD بالا، کاهش رطوبت امری اجتناب‌ناپذیر است که این اثر در خاک سطحی بارزتر است؛ هر دوی این عوامل از عوامل موثر بر عملکرد گندم دیم هستند (Ping & Dobermann, 2006). مولفه چهارم (PC_4)، که $9/6$ درصد از کل واریانس را نشان می‌دهد، دارای بیشترین بار عاملی با درصد شن و رس است. این عامل می‌تواند در توانایی خاک در جذب و نگهداری آب و عرضه آن به ریشه گیاه موثر باشد. مولفه پنجم $7/3$ درصد از کل واریانس را توجیه می‌نماید. این مولفه دارای بار عاملی مثبت با پتاسیم قابل اسفاده ($0/87$) و بار عاملی منفی با کربنات کلسیم ($0/79$) است. همبستگی بین کربنات کلسیم و پتاسیم قابل استفاده قوی و معنی‌دار است (جدول ۳-۲). نقشه کریجینگ PC_5 نشان‌دهنده تشابه آن با نقشه کریجینگ پتاسیم قابل استفاده و کربنات کلسیم است. پتاسیم قابل استفاده از ویژگی‌های موثر بر عملکرد محصول است. مولفه ششم $6/6$ درصد از کل واریانس را نشان می‌دهد، و بیشترین بار عاملی مثبت را با فسفر قابل استفاده ($0/84$) و بار عاملی متوسط با ازت و جهت شیب نشان می‌دهد. Lee et al. (2006) فسفر قابل استفاده را به‌عنوان یک ویژگی موثر بر کیفیت خاک در سیستم‌های زراعی با تناوب محصولات معرفی کردند. بررسی نقشه کریجینگ PC_6 نشان‌دهنده تشابه نقشه کریجینگ این عامل با نقشه کریجینگ فسفر قابل استفاده خاک است. بالا بودن اشتراک واریانس بیان می‌کند که سهم بیشتری از واریانس آن متغیر توسط عامل‌ها تشریح می‌گردد و نسبت به متغیرهای با اشتراک واریانس بسیار کم ترجیح داده می‌شود. نقشه‌های کریجینگ ایجاد شده شش PC (شکل ۴) و مقایسه این نقشه‌ها با نقشه‌های کریجینگ 17 متغیر به‌کار رفته در این مطالعه (شکل ۳)، نشان‌دهنده نقش موثر متغیرها با میزان اشتراک واریانس بیشتر در هر مولفه اصلی است، که بررسی بصری نقشه‌ها تاییدکننده این امر است. به‌طور خلاصه، تجزیه به مولفه‌های اصلی، 17 ویژگی مورد مطالعه را در شش مولفه اصلی دسته‌بندی نمود که بیان‌کننده بیشترین توزیع مکانی در این ویژگی‌ها هستند.

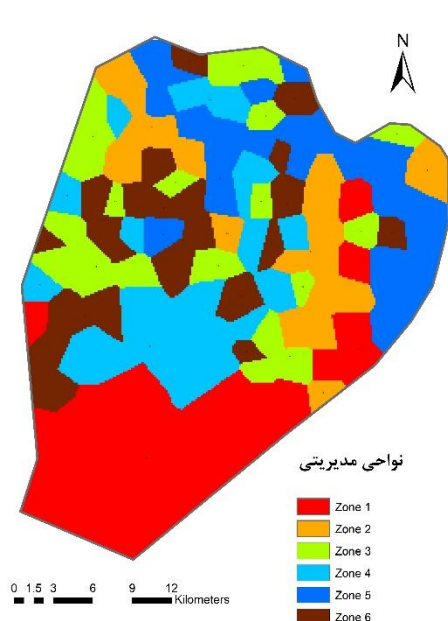
خوشه‌بندی و تعیین نواحی مدیریتی

بار عامل‌ها در شش مولفه اصلی جهت تعیین MZs مورد استفاده قرار گرفت. بار عامل‌ها به‌عنوان ورودی در نرم‌افزار FuzMe جهت طبقه‌بندی شش PCs به MZs با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی k -mean مورد استفاده قرار گرفت. با خوشه‌بندی این PC تعداد بهینه MZs مشخص شدند. ارزش شاخص‌های FPI و NCE در مقابل تعداد خوشه‌ها برای تعیین MZs در جدول ۶ نشان داده شده است. حداقل ارزش FPI و NCE با تعداد شش خوشه (MZs) جهت کشت گندم دیم در منطقه مطالعاتی بدست آمد (جدول ۶). تعداد بهینه خوشه‌ها زمانی تعیین می‌گردد که هر شاخص در حداقل باشد. جهت نمایش تمایز آماری معنی‌دار بین MZs و همچنین بررسی اینکه آیا ترکیب PCA و الگوریتم خوشه‌ای می‌تواند نقش موثری در طراحی MZs داشته باشند، از تجزیه واریانس استفاده گردید (Xin-Zhong et al., 2009).

جدول ۶. مقادیر FPI و NCE محاسبه‌شده جهت تعیین تعداد خوشه بهینه

کلاس	FPI	NCE
۲	$0/905$	$0/929$
۳	$0/813$	$0/836$
۴	$0/762$	$0/775$
۵	$0/738$	$0/739$
۶	$0/736$	$0/726$
۷	$0/740$	$0/720$

ناهمگونی بین ویژگی‌های خاکی و توپوگرافی و طیفی در بین MZs مشهود بود. بین ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری در شش ناحیه مدیریتی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، تفاوت معنی‌دار بین ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی در MZs مشهود بود (جدول ۷). مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ناحیه یک جز نواحی است که دارای مقدار شن بالا، درصد رس پایین، محتوای رطوبت کم و ازت پایین است. از نقطه نظر توپوگرافی این ناحیه جز نواحی است که کمترین شیب، ارتفاع و ناهمواری سطح زمین را دارد. در این ناحیه، مزارعی را شامل می‌گردد که بیشترین دمای سطح زمین را تجربه نموده‌اند. که می‌توان پایین بودن محتوای رطوبت خاک و SMI را در این مزارع به این مسئله نسبت داد.



شکل ۵. نواحی مدیریتی کشت گندم دیم در منطقه مورد مطالعه.

می‌توان ناحیه چهار را جز نواحی دانست که شرایط مناسب‌تری در مقایسه با نواحی دیگر جهت کشت گندم دیم را دارا است. این ناحیه از نظر NPK شرایط مناسب‌تری را نسبت به سایر نواحی دارا است. بررسی شرایط فیزیکی این ناحیه پایین بودن میزان کربنات کلسیم را در این ناحیه در مقایسه با سایر نواحی نشان می‌دهد. از نظر ویژگی‌های توپوگرافی، مزارع گندم دیم در این ناحیه مطالعاتی در ارتفاع بالاتری در مقایسه با نواحی یک، دو و پنج قرار دارند. بیشترین میانگین شیب در نواحی کشت گندم دیم در این ناحیه مطالعاتی مشاهده شد. ویژگی‌های توپوگرافی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک دارند و تأثیرات آنها بسته به ویژگی خاص و شرایط محیطی می‌تواند متفاوت باشد. درک این روابط می‌تواند به اطلاع رسانی شیوه‌های مدیریت زمین و بهبود کیفیت خاک و رشد گیاهان در مناطق مختلف کمک کند.

جدول ۷. مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک و شاخص‌های توپوگرافی در شش ناحیه مدیریتی

متغیرها	MZ ₁	MZ ₂	MZ ₃	MZ ₄	MZ ₅	MZ ₆
تعداد مناطق کشت گندم	۳۱	۱۸	۲۳	۲۰	۲۵	۲۳
شن	۴۰/۳ ^{h*}	۴۲/۰ ^b	۲۶/۷ ^a	۳۶/۷ ^b	۲۲/۶ ^a	۳۹/۹ ^b
رس	۲۵/۵ ^a	۲۴/۰ ^a	۳۲/۲ ^{bc}	۳۰/۶ ^b	۳۵/۲ ^b	۲۵/۰ ^a
کربنات کلسیم	۹/۱ ^a	۱۰/۳ ^a	۲۱/۵ ^b	۸/۳ ^a	۲۰/۷ ^b	۲۶/۲ ^b
ماده آلی	۱/۱۹ ^a	۱/۳۲ ^a	۱/۳۵ ^a	۱/۳۶ ^a	۱/۸۰ ^a	۰/۹۱ ^a
جرم مخصوص ظاهری	۱/۲۶ ^a	۱/۲۲ ^a	۱/۲۱ ^a	۱/۲۰ ^a	۱/۲۱ ^a	۱/۲۵ ^a
محتوای رطوبت خاک	۰/۱۳۷ ^a	۰/۱۶۲ ^b	۰/۱۵۹ ^b	۰/۱۶۳ ^b	۰/۱۸۱ ^c	۰/۱۵۳ ^b
ازت کل	۵۳۳ ^a	۷۷۳ ^b	۷۴۴ ^b	۸۰۳ ^b	۰/۵۶۵ ^a	۵۶۶ ^a
فسفر قابل استفاده	۶/۷ ^{ab}	۹/۷ ^{cd}	۱۱/۳ ^d	۹/۱ ^{abcd}	۵/۷ ^a	۷/۷ ^{abc}
پتاسیم قابل استفاده	۳۸۵ ^b	۴۸۰ ^c	۳۵۶ ^b	۴۲۷ ^{bc}	۳۸۳ ^b	۲۳۷ ^a
فاکتور طول شیب	۰/۳۹ ^a	۰/۵۴ ^a	۰/۴۳ ^a	۲/۳۹ ^c	۰/۴۴ ^a	۱/۵۷ ^b
جهت شیب	۱۶۰ ^{bc}	۲۱۴ ^b	۱۱۳ ^a	۱۴۹ ^{ab}	۲۱۹ ^b	۱۴۹ ^{ab}
شیب	۲/۴۴ ^a	۳/۱۱ ^a	۲/۵۰ ^a	۸/۴۵ ^c	۲/۷۴ ^a	۵/۳۱ ^b
ارتفاع	۱۳۹۹ ^a	۱۴۰۶ ^a	۱۵۷۰ ^b	۱۵۶۳ ^b	۱۳۸۲ ^a	۱۵۶۹ ^b
شاخص خیزی توپوگرافی	۸/۷۱ ^{ab}	۸/۵۷ ^{ab}	۱۰/۰ ^b	۷/۴۴ ^a	۹/۷۳ ^b	۸/۹۹ ^{ab}
شاخص رطوبت	۰/۱۸ ^a	۰/۳۹ ^{ab}	۰/۳۷ ^{ab}	۰/۳۳ ^a	۰/۴۱ ^b	۰/۳۵ ^a
دمای سطح زمین	۴۸/۸ ^c	۴۳/۱ ^{ab}	۴۳/۷ ^{ab}	۴۴/۴ ^b	۴۲/۵ ^a	۴۴/۱ ^b
شاخص ناهمواری زمین	۰/۸۹ ^a	۱/۱۹ ^a	۰/۹۶ ^a	۲/۸۸ ^c	۱/۰۵ ^a	۱/۹۳ ^b

* معنی‌داری در سطح ۱ درصد می‌باشد.



با توجه به جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که پایش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با در نظر گرفتن ویژگی‌های توپوگرافی و طیفی در مقیاس ناحیه‌ای جهت بررسی تغییرات در منابع خاکی ضرورت دارد. شاخص‌های به‌کاررفته نشان دادند که در منطقه مطالعه‌شده کمبود عناصر غذایی و کم بودن میزان رطوبت به عنوان محدودیت‌های مهم در تولید پایدار گندم دیم به شمار می‌رود. ارزش میانگین متغیرهای به‌کاررفته در تحلیل خوشه‌بندی فازی جهت تقسیم اراضی کشت گندم دیم به نواحی همگون، می‌تواند به‌عنوان مرجعی در تعیین نواحی مدیریت آبیاری و حاصلخیزی خاک استفاده شود. این امر می‌تواند استراتژی‌های مؤثرتری را در زمینه حفاظت و مدیریت خاک که تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک و اثرات ویژگی‌های توپوگرافی را در نظر می‌گیرد، ارائه دهد. از این رو، بر اساس مقادیر ویژگی‌های خاک در MZهای مختلف، گزینه‌های مدیریتی مختلفی را می‌توان برای MZهای مختلف ابداع کرد. بنابراین، اگر مدیران مزرعه دانش کافی در مورد ویژگی‌های خاک داشته باشند و براین اساس مدیریت کشاورزی را طراحی کنند، کاربرد MZها افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، توزیع مکانی برخی از ویژگی‌های خاکی و ویژگی‌ها و شاخص‌های توپوگرافی و طیفی در مزارع کشت گندم دیم، با استفاده از ابزارهای زمین‌آماری مورد ارزیابی قرار گرفت و با استفاده از PCA و خوشه‌بندی فازی، منطقه مورد مطالعه در شش ناحیه مدیریتی خاک تقسیم‌بندی شد. این مطالعه تنوع گسترده‌ای در مقادیر ویژگی‌های به‌کاررفته در مزارع کشت گندم دیم نشان داد. همبستگی مثبت و منفی معنی‌دار در غالب موارد بین ویژگی‌های به‌کاربرده شده مشاهده شد. تجزیه و تحلیل زمین‌آماری نشان داد که مدل‌های نیم‌تغییرنمای نمای و کروی بهترین مدل‌ها جهت مطالعه ویژگی‌های به‌کاررفته در این مطالعه بودند. ویژگی‌های خاک وابستگی مکانی ضعیف تا قوی را نشان دادند. شش ناحیه مدیریتی در منطقه مطالعاتی با استفاده از PCA و k-mean ایجاد گردید که به‌طور قابل توجهی از لحاظ ویژگی‌های به‌کاررفته متفاوت بودند. مقادیر میانگین در هر منطقه می‌تواند به‌عنوان مرجعی جهت کاربرد کود و مدیریت زراعی جهت رسیدن به کشت بهینه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان مناطق بهینه از نقطه‌نظر ویژگی‌های توپوگرافی را جهت افزایش تولید محصول به‌کاربرد. اطلاعات بدست آمده از MZs می‌تواند جهت بهینه‌سازی روش‌های نمونه‌برداری در مطالعات آینده کمک‌کننده باشد. نتایج ما استفاده از یک سیستم مبتنی بر ویژگی‌های خاکی، توپوگرافی و طیفی را جهت توسعه MZs و رسیدن به کشت بهینه را ارائه نمود. می‌توان بیان داشت که دقت در ویژگی‌های توپوگرافی منطقه در برنامه‌ریزی کشت گندم دیم می‌تواند به حداکثر رساندن عملکرد محصول کمک کند. تعیین مناطق برای کشت گندم دیم با استفاده از TRI، درصد شیب، طول شیب، دمای سطح زمین و سایر متغیرها، یک رویکرد ارزشمند برای بهینه‌سازی شیوه‌های کشاورزی و مدیریت منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این مناطق می‌توانند به کشاورزان در تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد انتخاب محصول، تکنیک‌های کاشت، استراتژی‌های آبیاری و حفاظت خاک کمک‌کننده باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

موسوی، سید روح‌اله، سرمیدیان، فریدون، و رحمانی، اصغر. (۱۳۹۸). مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی کلاس خاک با استفاده از الگوریتم یادگیری رگرسیون درختی توسعه‌یافته و جنگل‌های تصادفی در بخشی از اراضی دشت قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*. دوره ۵۰، شماره ۱۰، موسوی، سید روح‌اله، سرمیدیان، فریدون، امید، محمود، و بوگارت، پاتریک. (۱۴۰۰). مدل‌سازی رقومی تغییرات سه بعدی شوری خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در اراضی خشک و نیمه‌خشک دشت قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*. دوره ۵۲، شماره ۷.

REFERENCES

- Aggelopoulou, K., Castrignanò, A., Gemtos, T., & De Benedetto, D. (2013). Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 119-130.
- Agyeman, P. C., Khosravi, V., Kebonye, N. M., John, K., Borůvka, L., & Vašát, R. (2022). Using spectral indices and terrain attribute datasets and their combination in the prediction of cadmium content in agricultural soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107077.
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT satellite data. *Journal of sensors*, 2016, 1-8.

- Behera, S. 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, 251-259.
- Behera, S. K., & Shukla, A. K. (2015). Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India. *Land Degradation & Development*, 26(1), 71-79.
- Bogunovic, I., Pereira, P., & Brevik, E. C. (2017). Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. *Science of The Total Environment*, 584, 535-545.
- Brevik, E. C., Calzolari, C., Miller, B. A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., & Jordán, A. (2016). Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, 264, 256-274.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J., Parkin, T., Karlen, D., Turco, R., & Konopka, A. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501-1511.
- Carr, P., Carlson, G., Jacobsen, J., Nielsen, G., & Skogley, E. (1991). Farming soils, not fields: A strategy for increasing fertilizer profitability. *Journal of Production Agriculture*, 4(1), 57-61.
- Da Silva, J. M., & Silva, L. L. (2008). Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystems Engineering*, 101(2), 183-190.
- Di Virgilio, N., Monti, A., & Venturi, G. (2007). Spatial variability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) yield as related to soil parameters in a small field. *Field Crops Research*, 101(2), 232-239.
- Eldeiry, A. A., & Garcia, L. A. (2012). Evaluating the performance of ordinary kriging in mapping soil salinity. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 138(12), 1046-1059.
- Ferreira, V., Panagopoulos, T., Andrade, R., Guerrero, C., & Loures, L. (2015). Spatial variability of soil properties and soil erodibility in the Alqueva reservoir watershed. *Solid Earth*, 6(2), 383-392.
- Foroughifar, H., Jafarzadeh, A., Torabi, H., Pakpour, A., & Miransari, M. (2013). Using geostatistics and geographic information system techniques to characterize spatial variability of soil properties, including micronutrients. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(8), 1273-1281.
- Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., & Fraisse, C. W. (2004). Management zone analyst (MZA) software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96(1), 100-108.
- Gardner, W. H. (1986). Water content. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 493-544.
- Gee, G., & Bauder, J. (1986). Particle-size analysis 1. *Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods,(methodsofsoilan1)*. In (pp. 383-411).
- Hornung, A., Khosla, R., Reich, R., Inman, D., & Westfall, D. (2006). Comparison of site-specific management zones: Soil-color-based and yield-based. *Agronomy Journal*, 98(2), 407-415.
- Iqbal, J., Read, J. J., Thomasson, A. J., & Jenkins, J. N. (2005). Relationships between soil-landscape and dryland cotton lint yield. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 872-882.
- Jiang, P., & Thelen, K. (2004). Effect of soil and topographic properties on crop yield in a North-Central corn-soybean cropping system. *Agronomy Journal*, 96(1), 252-258.
- Johnson, C. K., Mortensen, D. A., Wienhold, B. J., Shanahan, J. F., & Doran, J. W. (2003). Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. *Agronomy Journal*, 95(2), 303-315.
- Karydas, C., Iatrou, M., Iatrou, G., & Mourelatos, S. (2020). Management zone delineation for site-specific fertilization in rice crop using multi-temporal RapidEye imagery. *Remote Sensing*, 12(16), 2604.
- Kerry, R., & Oliver, M. (2004). Average variograms to guide soil sampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 307-325.
- Kravchenko, A., Robertson, G., Thelen, K., & Harwood, R. (2005). Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agronomy Journal*, 97(2), 514-523.
- Lee, C.-H., Wu, M.-Y., Asio, V. B., & Chen, Z.-S. (2006). Using a soil quality index to assess the effects of applying swine manure compost on soil quality under a crop rotation system in Taiwan. *Soil Science*, 171(3), 210-222.
- Liu, W., Lu, F., Chen, G., Xu, X., & Yu, H. (2021). Site-specific management zones based on geostatistical and fuzzy clustering approach in a coastal reclaimed area of abandoned salt pan. *Chilean journal of agricultural research*, 81(3), 420-433.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2007). Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. *Geoderma*, 140(4), 324-336.



- Mousavi, S., Sarmadian, F., Alijani, Z., & Taati, A. (2017). Land suitability evaluation for irrigating wheat by geopedological approach and geographic information system: A case study of Qazvin plain, Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 6(3), 275-284.
- Mousavi, R., Sarmadian, F., & Rahmani, A. (2019). Modelling and prediction of soil classes using boosting regression tree and random forests machine learning algorithms in some part of Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10). (In Persian)
- Mousavi, R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2021). Digital modeling of three-dimensional soil salinity variation using machine learning algorithms in arid and semi-arid lands of qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(7). (In Persian).
- Nelson, L., & Heidel, H. (1952). Soil analysis methods as used in the iowa state college soil testing laboratory.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010
- Olsen, S. (1982). Anion resin extractable phosphorus. *Methods of Soil Analysis*, 2, 423-424.
- Ortega, R. A., & Santibanez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(1), 49-59.
- Pablos, M., Martínez-Fernández, J., Piles, M., Sánchez, N., Vall-llossera, M., & Camps, A. (2016). Multi-temporal evaluation of soil moisture and land surface temperature dynamics using in situ and satellite observations. *Remote Sensing*, 8(7), 587.
- Pedroso, M., Taylor, J., Tisseyre, B., Charnomordic, B., & Guillaume, S. (2010). A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1), 199-208.
- Peralta, N. R., & Costa, J. L. (2013). Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 218-226.
- Ping, J., & Dobermann, A. (2006). Variation in the precision of soil organic carbon maps due to different laboratory and spatial prediction methods. *Soil Science*, 171(5), 374-387.
- Reyniers, M., Maertens, K., Vrindts, E., & De Baerdemaeker, J. (2006). Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. *Soil and Tillage Research*, 88(1-2), 262-273.
- Reza, S., Baruah, U., Sarkar, D., & Das, T. (2010). Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for predication of spatial variability of some chemical parameters of Dhalai district, Tripura.
- Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). Index that quantifies topographic heterogeneity. *intermountain Journal of sciences*, 5(1-4), 23-27.
- Ruehlmann, J., & Körschens, M. (2009). Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 73(3), 876-885.
- Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., & Luchiari Jr, A. (2004). Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal*, 96(1), 195-203.
- Sharma, S. (1996). *Applied Multivariate Techniques*. John Wiley&Sons. Inc, New York.
- Taylor, J. C., Wood, G., Earl, R., & Godwin, R. (2003). Soil factors and their influence on within-field crop variability, Part II: Spatial analysis and determination of management zones. *Biosystems Engineering*, 84(4), 441-453.
- Thapa, G., & Yila, O. M. (2012). Farmers' land management practices and status of agricultural land in the Jos Plateau, Nigeria. *Land Degradation & Development*, 23(3), 263-277.
- Triantafilis, J., Odeh, I., & McBratney, A. (2001). Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 869-878.
- Tripathi, R., Nayak, A., Shahid, M., Lal, B., Gautam, P., Raja, R., . . . Sahoo, R. (2015). Delineation of soil management zones for a rice cultivated area in eastern India using fuzzy clustering. *Catena*, 133, 128-136.
- Tunesi, S., Poggi, V., & Gessa, C. (1999). Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: the role of calcium ions in solution and carbonate minerals. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 53, 219-227.
- Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. d., Pinto, F. d. A. d. C., Santos, N. T., & Santos, F. L. (2012). Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. *Scientia Agricola*, 69(3), 173-179.
- Vieira, S. R., & Paz Gonzalez, A. (2003). Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, 62, 127-138.

- Wang, K., Huggins, D. R., & Tao, H. (2019). Rapid mapping of winter wheat yield, protein, and nitrogen uptake using remote and proximal sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101921.
- Xiang, X., Wu, X., Chen, X., Song, Q., & Xue, X. (2017). Integrating topography and soil properties for spatial soil moisture storage modeling. *Water*, 9(9), 647.
- Xin-Zhong, W., Guo-Shun, L., Hong-Chao, H., Zhen-Hai, W., Qing-Hua, L., Xu-Feng, L., Yan-Tao, L. (2009). Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2), 168-175.
- Zeraatpishah, 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.
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., & Gao, P. (2013). Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 24(5), 499-510.



Using topographical and spectral indices to delineate management zone in drylands wheat cultivated area, Qazvin.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Effective and sustainable soil management practices are crucial for maintaining soil fertility and preventing soil degradation. Sustainable soil management involves adopting practices that minimize soil erosion, reduce nutrient loss, promote organic matter accumulation, and optimize water holding capacity.

Objective:

This study aims to address the critical aspect of sustainable soil management by employing a robust understanding of soil properties to ensure long-term soil fertility and prevent soil degradation. In particular, the study focuses on the cultivation of wheat and proposes the use of management zones (MZs) as an effective strategy to optimize crop yield and enhance overall productivity.

Material and method:

To carry out the study, a comprehensive sampling approach was adopted, involving the collection of 140 soil samples from various wheat fields. The samples were carefully analyzed to determine both the physical and chemical properties of the soil. Additionally, topographical and spectral indices were incorporated to gain a more holistic understanding of the study area. The next step involved the delineation of management zones based on the collected data. This process consisted of several key stages. First, the topographic properties of the study area were derived using advanced software tools like SAGA, coupled with a high-resolution Digital Elevation Model (DEM). These topographic properties played a crucial role in capturing the terrain characteristics that influence soil behavior and agricultural practices. To optimize the selection of variables for delineating the management zones, Principal Component Analysis (PCA) was employed. By reducing the dimensionality of the dataset, PCA facilitated a more efficient and insightful analysis of the data. The subsequent step involved clustering algorithms, which integrated the soil properties, topographical features, and spectral indices to define distinct management zones. This process incorporated geostatistical techniques to account for the spatial dependencies and variations within the study area. To evaluate the optimal number of management zones, two criteria, namely the Fuzziness Performance Index (FPI) and the Normalized Classification Entropy (NCE), were utilized. These criteria provided quantitative measures to assess the degree of uncertainty and classification accuracy, ensuring a robust and informed decision regarding the optimal number of management zones. The analysis of semivariograms and kriging, a geostatistical interpolation method, provided insights into the spatial distribution patterns and spatial dependency of the soil properties.

Result and Discussion:

The results indicated a range of spatial relationships, varying from weak to strong, across the different variables considered in the study. Based on a comprehensive analysis of the data, six Principal Components (PCs) were selected for further examination. These PCs, accounting for a substantial portion of the total variance (76.3%), were deemed crucial in explaining the underlying patterns and variations in the soil properties. Ultimately, based on the criteria of FPI and NCE, six distinct management zones were delineated. Each zone exhibited unique characteristics in terms of soil properties, topographical features, and spectral indices. The mean values of the soil properties within each management zone provided valuable insights into the variations and highlighted the heterogeneity across the study area. The findings of this study emphasize the effectiveness of adopting a systematic approach to delineate management zones for efficient soil management in wheat cultivation and other crop production systems. The proposed methodology allows for a targeted and site-specific approach, enabling farmers and land managers to optimize their agricultural practices, maximize crop production, and contribute to long-term soil health and sustainability.

Keywords: Management Zones, Fuzzy Clustering, Geostatistics.