Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Determining the critical limits of soil quality indicators for paddy fields in different landforms (Case study: Langarud, Guilan Province)

Seyedeh Fatemeh Nabavi [1] | Nafiseh Yaghmaeian Mahabadi[2]✉ | Hasan Ramezanpour [3] | Mohammad Bagher Farhangi[4] | Shahram Mahmoud Soltani[5]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: nabavi.f91@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 Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail hasramezanpour@yahoo.com
4. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: m.farhangi@guilan.ac.ir
5. Soil and Water Research Department, Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran. E-mail: shmsoltani@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 13, 2024

Revised: July. 23, 2024

Accepted: Aug. 12, 2024

Published online: Dec. 2024

Keywords:
Critical limits,
Norm value,
Relative yield,
Terrain attributes.

ABSTRACT

Assessment of soil quality and identification of key indicators with their critical limits are very important for maintaining soil functions and rice productivity. The aim of this research was to determine the minimum data set (MDS) based on terrain attributes and to establish critical limits based on rice yield in Langarud, Guilan Province. Composite soil samples (0-30 cm) were collected from three landforms: mountain, alluvial plain, and coastal area. The MDS in each landform were obtained using auxiliary data extracted from DEM, and the Norm values of soil properties. Finally, the integrated quality index (IQI) was calculated for each landform. Available potassium showed the highest correlation with rice yield in the coastal (R^2 = 0.87), alluvial plain (R^2 = 0.85), and mountain (R^2 = 0.90). The lower and upper limits of the IQI for 40% and 80% relative yield were 0.39 and 0.65 in coastal area, 0.56 and 0.76 in alluvial plain, and 0.41 and 0.73 in mountain, respectively. The highest correlation between the soil quality index (SQI) and relative yield (R^2 = 0.87) was obtained for mountain. The mapping showed that the low productivity paddy fields are located in the coastal areas, where the SQI is the lowest. This observation is possibly attributed to the coarser soil texture and the proximity to the Caspian Sea. In contrast, paddy fields in mountain exhibited the highest SQI and yield. Therefore, determining the critical limits for MDS is essential for improving management practices and achieving sustainable productivity in paddy fields.

Cite this article Nabavi, S. F., Yaghmaeian Mahabadi, N., Ramezanpour, H., Farhangi, M. B., & Mahmoud Soltani, Sh. (2024). Determining the critical limits of soil quality indicators for paddy fields in different landforms (Case study: Langarud, Guilan Province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (10), 1679-1699. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377878.669731

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377878.669731

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Identifying key indicators and determining critical limits of soil quality that affect fertilization levels is crucial. Enhancing the productivity of paddy fields, which is important for ensuring national food security, is impeded by numerous challenges. Systematic evaluation of soil quality can support productivity enhancement. Disregarding this can lead to the ineffective use of chemical fertilizers, which not only fails to increase agricultural productivity but also imposes additional costs, disrupts the balance of nutrients in the soil, and contributes to environmental issues.

Objective:

The aim of this research was to establish the minimum data set (MDS) based on terrain attributes and norm values of soil indicators and, to identify upper and lower critical limits of the soil quality indicators and soil quality index based on the local rice yields under field condition in Langarud city, Guilan Province.

Material and method:

80 Composite soil samples were collected from three landforms, including mountain, alluvial plain, and coastal area, at depth of 0-30 cm, and 17 physical, chemical, and biological soil properties were measured. The principal components analysis (PCA) method was applied to identify the key soil indicators that better represent the effect on soil quality. The principal components with eigenvalues greater than one were considered for MDS selection. After determining the principal components, variables with high factor loadings in each principal component were separated using the factor rotation method. In order to reduce the number of components and select MDS, Bartlett's test and KMO coefficient were used. A KMO coefficient close to 1 is ideal, and typically, a value exceeding 0.6 is considered appropriate for conducting a PCA. Then, The MDS in each landform were obtained using auxiliary data extracted from the digital elevation model (DEM) and the Norm values of soil properties. Finally, the integrated quality index (IQI) was calculated for each landform. The critical limits of each MDS in different landforms were determined based on linear relationships between MDS indicators and relative yield (RY).

Result and Discussion:

The results showed that clay content, organic carbon, available potassium, soil microbial respiration, and phosphatase were identified as most important MDS influencing soil quality and crop yield in three landforms. Additionally, available potassium showed the highest correlation with rice yield in the coastal (R^2 = 0.87), alluvial plain (R^2 = 0.85), and mountain (R^2 = 0.90). The lower and upper limits of the soil quality index for 40% and 80% relative yield were 0.39 and 0.65 in coastal area, 0.56 and 0.76 in alluvial plain, and 0.41 and 0.73 in mountain, respectively. The highest correlation between the soil quality index and relative yield (R^2 = 0.87) was obtained for mountain. The mapping showed that the low productivity paddy fields are located in the coastal areas, where the average soil quality index is the lowest. This observation is possibly attributed to the coarser soil texture and the proximity to the Caspian Sea. In contrast, paddy fields in mountain with the highest average of soil quality index have the highest yield. Therefore, determining the critical limits of MDS as a function of rice yield is crucial for improving management practices and achieving sustainable productivity in paddy fields.

Author Contributions

Seyedeh Fatemeh Nabavi: methodology, software, data curation, writing-original draft, formal analysis. Nafiseh Yaghmaeian Mahabadi: conceptualization, methodology, data curation, validation, writing-review and editing, supervision, project administration. Hassan Ramezanpour: writing-review and editing. Mohammad Bagher Farhangi: data curation, validation, writing-review and editing. Shahram Mahmoud Soltani: writing-review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Department of Soil Science, University of Guilan, Iran.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۱۰ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تعیین حدود بحرانی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک شالیزار در لندفرم‌های مختلف (مطالعه موردی: لنگرود، استان گیلان)

سیده فاطمه نبوی [۱] | نفیسه یغمائیان مهابادی [۲]✉ | حسن رمضانپور [۳] | محمدباقر فرهنگی [۴] | شهرام محمود سلطانی [۵]

۱. گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: nabavi.f91@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir
۳. گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: hasramezanpour@yahoo.com
۴. گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: m.farhangi@guilan.ac.ir
۵. بخش تحقیقات خاک و آب، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران. رایانامه: shmsoltani@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۲
تاریخ انتشار: دیماه ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
ارزش نرم،
حدود بحرانی،
عملکرد نسبی،
ویژگی‌های زمین.

چکیده

ارزیابی کیفیت خاک و شناسایی شاخص‌های کلیدی با حدود بحرانی آن‌ها برای حفظ عملکرد طبیعی خاک و بهره‌وری محصولات به‌ویژه برنج، بسیار مهم است. هدف از این پژوهش تعیین حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) بر اساس ویژگی‌های لندفرم‌ها و تعیین حدود بحرانی آن‌ها بر اساس عملکرد برنج در شهرستان لنگرود استان گیلان می‌باشد. به این منظور ۸۰ نمونه خاک مرکب از سه لندفرم کوهستان، دشت آبرفتی و اراضی ساحلی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد و در مجموع ۱۷ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های MDS در هر لندفرم با استفاده از داده‌های کمکی استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و مقادیر ارزش نرم ویژگی‌های خاک به دست آمد. در نهایت شاخص کیفیت تجمعی (IQI) برای هر لندفرم محاسبه شد. نتایج نشان داد که درصد رس، کربن آلی، پتاسیم قابل‌استفاده، تنفس میکروبی خاک و فسفاتاز ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و عملکرد محصول در هر سه لندفرم می‌باشند. همچنین پتاسیم قابل‌استفاده در هر سه لندفرم اراضی ساحلی (R^2=۰/۸۷)، دشت آبرفتی (R^2=۰/۸۵) و کوهستان (R^2=۰/۹۰) بالاترین همبستگی با عملکرد برنج را نشان داد. حد پایین و بالای شاخص کیفیت خاک در اراضی ساحلی به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۶۵، در دشت آبرفتی ۰/۵۶ و ۰/۷۶ و در کوهستان ۰/۴۱ و ۰/۷۳ برای رسیدن به ۴۰ و ۸۰ درصد عملکرد نسبی بدست آمد. بیشترین همبستگی بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد نسبی (R^2=۰/۸۷) برای شالیزارهای کوهستان به دست آمد. پهنه‌بندی‌ها نشان داد که شالیزارهای کم بازده در مناطق ساحلی قرار داشته و از کمترین میانگین شاخص کیفیت خاک برخوردار هستند که به دلیل بافت سبک‌تر خاک و مجاورت با دریای خزر است. در مقابل شالیزارهای کوهستان با بیشترین میانگین شاخص کیفیت خاک، از بیشترین مقدار عملکرد محصول برخوردار هستند. بنابراین تعیین حدود بحرانی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک به عنوان تابعی از عملکرد برنج، در بهبود شیوه‌های مدیریتی و بهره‌وری پایدار اراضی شالیزاری کاربرد دارد.

استناد: نبوی، سیده فاطمه؛ یغمائیان مهابادی، نفیسه؛ رمضانپور، حسن؛ فرهنگی، محمدباقر و محمود سلطانی، شهرام؛ (۱۴۰۳). تعیین حدود بحرانی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک شالیزار در لندفرم‌های مختلف (مطالعه موردی: لنگرود، استان گیلان)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۱۰)، ۱۶۹۹-۱۶۷۹.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377878.669731

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377878.669731

مقدمه

برنج *(Oryza sativa L.)* یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی و از اساسی‌ترین منابع تغذیه در کشورهای در حال توسعه است (Barah & Pandey, 2005). استان گیلان با وجود اختصاص ۲۴/۶ درصد از سطح زیر کشت خود به شالیزارها، تنها ۲۶ درصد از تولید سالانه برنج کشور را تأمین می‌کند (احمدی و همکاران، ۲۰۱۸). افزایش بهره‌وری اراضی شالیزاری می‌تواند به عنوان یک راهکار مهم برای افزایش تولید و تامین امنیت غذایی محسوب شود. یکی از اهداف اصلی مدیریت پایدار اراضی شناسایی روش‌هایی است که از یک‌سو باعث ارتقا کمّی و کیفی عملکرد محصول در طولانی‌مدت گردند و از سوی دیگر ضمن حفظ کیفیت خاک[1] (SQ)، منجر به تخریب اراضی نشوند (Takoutsing et al., 2016; Choi et al., 2017). بررسی‌های مختلف نشان می‌دهند که نوع مدیریت اراضی بر میزان پاسخ گیاه تأثیر زیادی داشته و حدود بحرانی و مطلوبیت ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Glover et al., 2000; Tian et al., 2020).

برای رسیدن به حدودی از غلظت عناصر در خاک که بتواند عملکرد نسبی مطلوبی را به همراه داشته باشد، ابتدا بایستی شناخت کافی از وضعیت منطقه پیدا نمود تا اثرگذارترین یا محدودکننده‌ترین عوامل مؤثر در عملکرد محصول مشخص شود (Merrill et al., 2013; Biswas et al., 2017). ارزیابی کیفیت خاک، رویکردی برای تشخیص زودهنگام اثرات نامطلوب شیوه‌های مدیریتی می‌باشد که به منظور حفظ عملکرد بالای محصول مهم است. در این راستا توسعه یک شاخص کیفیت خاک[2] (SQI) مناسب برای انواع مختلف خاک‌های زراعی ضروری می‌باشد (Askari & Holden, 2015). امروزه شاخص‌های کیفیت خاک به دلیل قابلیت استفاده آسان، انعطاف-پذیری و کمّی بودن متداول‌ترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک می‌باشند (Takoutsing et al., 2016). شاخص‌های کیفیت خاک در برگیرنده‌ی شیوه‌های تعریف‌شده‌ای برای گزینش، نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک هستند که اطلاعاتی در مورد توانایی آن در حمایت از عملکرد محصول ارائه می‌دهند (Samaei et al., 2022; Hemmati et al., 2023).

عملکرد محصول در واقع یک شاخص رایج برای کیفیت خاک است که تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی مانند اقلیم، توپوگرافی، خصوصیات خاک و عملیات مدیریتی قرار می‌گیرد و اطلاعات ارزشمندی در مورد ظرفیت خاک برای حمایت از رشد و بهره‌وری گیاه ارائه می‌دهد. در مقیاس محلی که تغییرات اقلیمی اندک است، ویژگی‌های زمین[3] و خصوصیات خاک از مهمترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد محصول می‌باشند (Shabani et al., 2012). ویژگی‌های زمین را می‌توان بر اساس ویژگی‌های مختلف ژئومورفیک مانند شیب، ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی و غیره شناسایی و مشخص کرد (Saleh et al., 2021). این ویژگی‌ها اطلاعات ارزشمندی در مورد شرایط خاک و تأثیر آن بر عملکرد محصول ارائه می‌دهند. Wang et al. (2019) در پژوهشی تأثیر ویژگی‌های لندفرم بر تولید برنج در استان هونان چین را مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش آن‌ها واحدهای لندفرم بر اساس عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای به کوه، تپه و دشت تفکیک شدند و نتایج نشان داد که عملکرد برنج با ارتفاع، شیب و زبری سطح خاک[4] رابطه منفی دارد. زبری بیش از حد سطح خاک در شالیزارها می‌تواند به فرسایش خاک کمک کند و تأثیرات منفی بر مواد مغذی خاک داشته باشد. Derakhshan-Babaei et al. (2021) به بررسی اثرات لندفرم‌ها و کاربری‌های مختلف بر کیفیت خاک حوضه آبریز کن در استان تهران پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های زمین نقش مهمی در کیفیت خاک و الگوهای فرسایش دارند. در چنین مناطقی، توپوگرافی خود می‌تواند محرک اصلی فرسایش باشد و تأثیر شیوه‌های کاربری زمین را تحت‌الشعاع قرار دهد.

از آنجا که تجزیه و تحلیل تعداد زیادی از ویژگی‌های خاک دشوار و زمان‌بر است، پژوهشگران تعداد محدودی از ویژگی‌های خاک که نماینده بهتری از کیفیت خاک باشند را به عنوان مجموعه‌ی حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک[5] (MDS) پیشنهاد کرده‌اند (Raiesi, 2017; Nabiollahi et al., 2018; Wu et al., 2019) که موجب آسانی کار و کاهش هزینه‌های ارزیابی کیفیت خاک می‌شود. مجموعه MDS متناسب با شرایط هر منطقه و نوع خاک موردمطالعه انتخاب می‌شود و در برگیرنده ویژگی‌هایی است که به نوع خاک، کاربری و سیستم مدیریتی کشاورزی منطقه موردنظر وابسته است (Friedman et al., 2001). روش آنالیز مؤلفه اصلی[6] (PCA) برای

1 Soil quality
2 Soil quality index
3 Terrain attributes
4 Soil surface roughness
5 Minimum data set
6 Principal component analysis

کاهش حجم داده‌ها، ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را بر کیفیت خاک منطقه دارند از میان کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک[1] (TDS) انتخاب می‌کند (Sheidai et al, 2019; Pal et al., 2013). Jiang et al. (2020) در مطالعه‌ای کیفیت خاک را تحت تأثیر ویژگی‌های لندفرم در کاربری‌های مختلف (زراعی، مرتع و بایر) در استان شاندونگ چین بررسی کردند. در این پژوهش مقادیر MDS با استفاده از مقادیر نُرم[2] هر شاخص و ویژگی‌های لندفرم (ارتفاع، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی[3] (NDVI)، فاصله نقاط نمونه‌برداری تا رودخانه و خط ساحلی) به‌دست آمد. نتایج نشان داد که شاخص کیفیت خاک به‌دست آمده در کاربری کشاورزی نسبت به سایر کاربری‌ها بیشترین مقدار بوده است و شاخص NDVI همبستگی بالایی با شاخص کیفیت خاک داشته است.

شالیزارها بخش بزرگی از زمین‌های کشاورزی شمالی ایران را در حوزه دریای خزر تشکیل می‌دهند. با این حال، تولید برنج آن‌ها که غذای اصلی مردم ایران است، رضایت‌بخش نیست (Rezaei et al., 2020). تحقیقات اخیر نشان داده است که عوامل مختلفی می‌تواند در کیفیت خاک و تولید برنج تأثیرگذار باشند (Hemmati et al., 2023; Tian et al., 2020). با این حال، ارزیابی کیفیت خاک بر اساس تعیین حدود بحرانی ویژگی‌های خاک در شرایط واقعی مزرعه در شمال ایران محدود است. ما فرض کردیم برخی از ویژگی‌های لندفرم‌ها، کوددهی نامتعادل و گلخرابی ممکن است اثرات منفی بر خصوصیات مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی کیفیت خاک و عملکرد محصول در منطقه موردمطالعه داشته باشد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف: (الف) تعیین حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) بر اساس ویژگی‌های لندفرم‌ها و مقادیر نُرم ویژگی‌های خاک و (ب) شناسایی حدود بحرانی بالا و پایین شاخص کیفیت خاک بر اساس عملکرد برنج در شهرستان لنگرود استان گیلان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

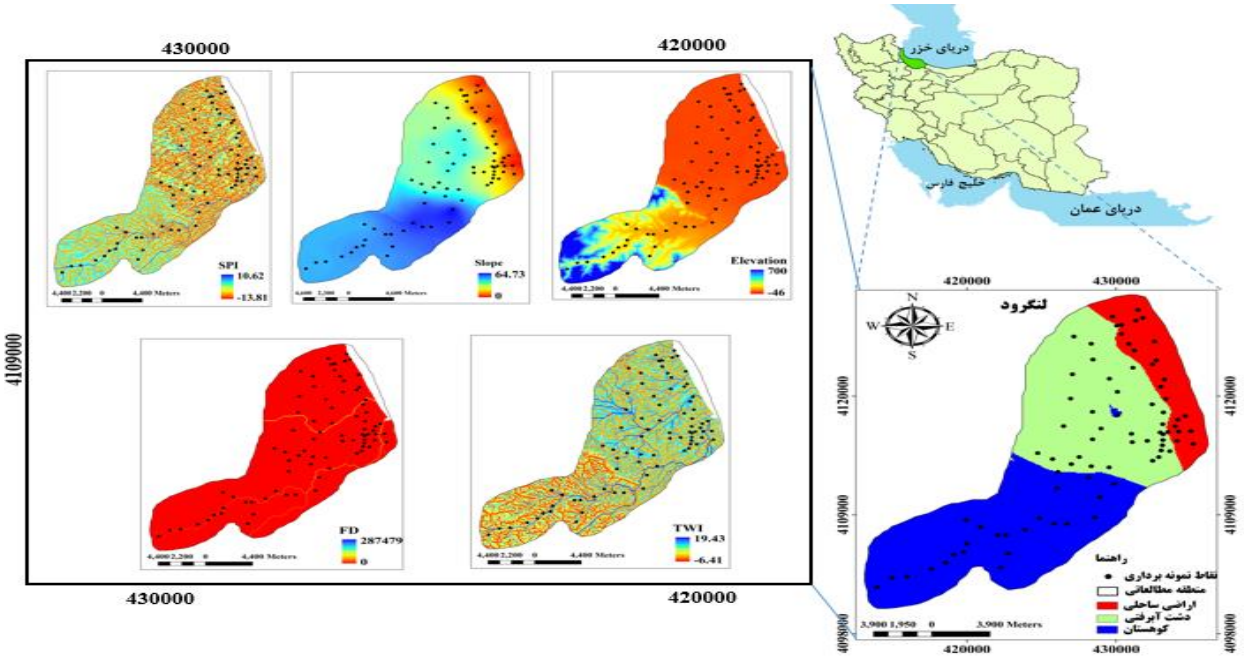
پژوهش حاضر در بخشی از شالیزارهای شهرستان لنگرود استان گیلان واقع بین طول‌های جغرافیایی ″۱۴ ′۰۳ °۵۰ و ″۱۹ ′۱۵ °۵۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ″۲۹ ′۰۳ °۳۷ و ″۱۰ ′۱۸ °۳۷ شمالی انجام شد (شکل ۱). رژیم رطوبتی خاک شامل اکوئیک و یودیک و رژیم حرارتی خاک ترمیک است (USDA, 2012). جهت دستیابی به اهداف ذکرشده، نمونه‌برداری از لندفرم‌های مختلف با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و بازدید میدانی انجام شد. در مجموع ۸۰ نمونه خاک مرکب از سه لندفرم کوهستان (۲۱ نمونه)، دشت آبرفتی (۳۹ نمونه) و اراضی ساحلی (۲۰ نمونه) به روش نمونه‌برداری تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شد. برای جلوگیری از تأثیر کاربرد کود در طول دوره رشد گیاه، نمونه‌برداری پس از برداشت محصول برنج صورت گرفت (Dengiz, 2019; Tian et al., 2020). همچنین انتخاب شالیزارها به‌گونه‌ای انجام شد که عملیات کشاورزی و مدیریت زراعی در آن‌ها تقریباً یکسان باشد. به منظور اندازه‌گیری عملکرد واقعی، برداشت محصول در پلاتی به وسعت یک مترمربع به مرکزیت محل‌های نمونه‌برداری خاک در شهریور ماه ۱۴۰۱ انجام شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شده، بخشی از نمونه‌های خاک برای آنالیز ویژگی‌های زیستی در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند (Biswas et al., 2017) و بخش دیگر، هواخشک شده و آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی روی آن‌ها انجام شد (Soil Survey Staff, 2014). با توجه به تأثیرپذیری کیفیت خاک از ویژگی‌های مختلف خاک، ۱۷ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شامل: درصد شن، رس و سیلت به روش هیدرومتر (Carter, 2000)، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پارافین (Blake & Hartge, 1986)، میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر (Kemper & Rosenau, 1986)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع[4] (EC) توسط دستگاه هدایت‌سنج (Rhoades 1982)، pH با استفاده از دستگاه pH متر (McLean 1982)، پتاسیم قابل‌استفاده به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Nelson & Heidel., 1952)، فسفر قابل‌استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1954)، نیتروژن کل خاک به روش کجلدال (Nelson & Sommer., 1996)، کربن آلی به روش والکی بلاک (Walkley & Black, 1934)، کربن زیست‌توده میکروبی (Vance et al., 1987)، نیتروژن زیست‌توده میکروبی (Vance et al., 1987) و فسفر زیست‌توده میکروبی به روش تدخین–استخراج (Brookes et al., 1982)، تنفس میکروبی خاک با استفاده از تصاعد دی‌اکسید کربن (Anderson, 1982) و فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و فسفاتاز (Tabatabai, 1994) اندازه‌گیری شدند.

---

1 Total data set
2 Norm values
3 Normalized difference vegetation
4 Electrical Conductivity

داده‌های کمکی

در این پژوهش از داده‌های کمکی استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع[۱] (DEM) شامل: ارتفاع، شیب، شاخص خیسی خاک[۲] (TWI)، شاخص قدرت جریان[۳] (SPI)، جهت جریان[۴] (FD) (شکل ۱) و نزدیکترین فاصله نقطه نمونه‌برداری تا رودخانه[۵] (Dr) و نزدیکترین فاصله نقطه نمونه‌برداری تا دریا[۶] (Ds) استفاده شد (Saleh et al., 2021; Jiang et al., 2020).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

ارزیابی شاخص کیفیت خاک

تعیین حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک

در ابتدا از روش PCA برای تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های خاک که نماینده بهتری از عوامل مؤثر بر کیفیت خاک هستند، استفاده شد. مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه[۷] بزرگتر از یک برای انتخاب MDS در نظر گرفته شد (Brejda et al., 2000). پس از تعیین مؤلفه‌های اصلی، در هر مؤلفه اصلی متغیرهایی که دارای بار عاملی بالا بودند با استفاده از روش چرخش عامل جدا شد. چرخش عامل از طریق واریومکس[۸] برای تفسیر مؤلفه‌ها استفاده می‌شود (Li et al., 2019). به منظور کاهش تعداد مؤلفه‌ها و انتخاب MDS از آزمون بارتلت و ضریب KMO[۹] استفاده شد. ضریب KMO نزدیک به ۱ ایده‌آل بوده و به طور کلی اگر مقدار آن بیش از ۰/۶ باشد، برای PCA مناسب است (Kaiser, 1960). مقدار نرم هر MDS برای هر سه لندفرم کوهستان، دشت آبرفتی و اراضی ساحلی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Burhan et al., 2021). در ادامه ارزش ویژگی‌ها[۱۰] با استفاده از ضریب تبیین[۱۱] (R^2) بین ویژگی‌های خاک و داده‌های کمکی بدست آمد و در نهایت در هر گروه ویژگی که بالاترین ارزش را داشته به عنوان MDS انتخاب شد (Tian et al., 2020; Saleh et al., 2021).

---

1 Digital Elevation Model
2 Topographic witness index
3 Stream power index
4 Flow direction
5 The nearest straight-line distance between the sampling point and the river
6 The nearest straight-line distance between the sampling point and the coastline
7 Eigen value
8 Varimax rotation
9 Kaiser-Meyer-Olkin
10 Indicator value
11 Coefficient of determination

$$N_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{k} uij^2 \lambda_j}$$ رابطهٔ ۱)

که در آن، N_i؛ مقدار نرم شاخص i در مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه ≤ ۱، uij؛ بار عاملی شاخص i در مؤلفه j و λ_j؛ ارزش ویژه مؤلفه j است.

نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک

با توجه به این‌که ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگونی می‌باشند، برای این‌که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، باید ویژگی‌های موردمطالعه را بی‌واحد کرد. برای این منظور از توابع نمره‌دهی خطی[1] استفاده شد (Liu et al., 2015).به این ترتیب که محدوده‌هایی از مقادیر ویژگی موردنظر که از نظر کیفیت خاک مطلوب‌ترین مقدار باشد، درجه عضویت ۱ و محدوده‌هایی که کمترین کیفیت را دارد، درجه عضویت صفر به آن تعلق می‌گیرد (Tian et al., 2020). در این پژوهش از توابع نمره‌دهی بیشتر- بهتر[2] (خصوصیاتی که افزایش آن‌ها موجب بهبود کیفیت خاک می‌گردد) و کمتر- بهتر[3] (خصوصیاتی که افزایش آن‌ها موجب کاهش کیفیت خاک می‌گردد) استفاده شد (رابطه ۲ و ۳) (Choudhury et al., 2021). به منظور تعیین وزن تعلق یافته به ویژگی‌های خاک سهم هر ویژگی[4] (COM) با استفاده از روش تجزیه عامل[5] (FA) محاسبه شد، سپس نسبت مقدار سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها به عنوان وزن هر ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد (Burhan et al., 2021).

$$SSF1: f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < L \\ 0.1 + \dfrac{0.9 \times (x - L)}{(u - L)} & L \le x \le u \\ 1 & x > u \end{cases}$$ رابطهٔ ۲)

$$SSF2: f(x) = \begin{cases} 1 & x < L \\ 0.1 + \dfrac{0.9 \times (u - x)}{(u - L)} & L \le x \le u \\ 0.1 & x > u \end{cases}$$ رابطهٔ ۳)

که در آن‌ها SSF1 و SSF2 به ترتیب توابع نمره‌دهی بیشتر- بهتر و کمتر- بهتر است که مقدار آن بین ۰/۱ تا ۱ می‌باشد، x مقدار اندازه‌گیری شده ویژگی خاک و L و U به ترتیب حدود بحرانی پایین و بالا هستند.

محاسبه شاخص کیفیت خاک

شاخص کیفیت تجمعی[6] (IQI) طبق رابطه ۴ از مجموع حاصل‌ضرب امتیاز هر ویژگی در ضریب وزنی آن محاسبه شد (Bi et al., 2013; Congreves et al., 2015) و در نهایت کلاس‌بندی شاخص کیفیت خاک منطقه مطالعاتی انجام گرفت (Qi et al., 2009; Samaei et al., 2022).

$$IQI = \sum_{i=1}^{n} N_i \times W_i$$ رابطهٔ ۴)

W_i؛ وزن ویژگی‌های MDS و N_i؛ نمره ویژگی‌های MDS می‌باشد.

تعیین حدود بحرانی

حدود بحرانی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک با توجه به مقدار حد مطلوب موردنیاز برای عملکرد بهینه و حفظ کیفیت خاک تعریف شده است. عملکرد نسبی[7] (RY) با استفاده از ۱۰۰ برابر عملکرد در هر مکان نمونه‌برداری تقسیم بر بیشترین عملکرد در منطقه محاسبه می‌شود (رابطه ۵) (Hemmati et al., 2023; Biswas et al., 2017).

1 Scoring functions
2 More is better
3 Less is better
4 Communality
5 Factor analysis
6 Integrated quality index
7 Relative yield

رابطهٔ ۵)
$$RY = \frac{\text{عملکرد هر مکان نمونه‌برداری}}{\text{بیشترین عملکرد منطقه}} \times ۱۰۰$$

حدود بحرانی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک بر اساس روابط خطی بین ویژگی‌های MDS و عملکرد نسبی (RY) به این ترتیب تعیین شدند: ۴۰ درصد ≤ کم، ۴۱ درصد –۸۰ درصد متوسط، و ۸۰ درصد < کافی (Lopes et al., 2013). به عبارتی ۴۰ و ۸۰ درصد عملکرد نسبی به ترتیب به عنوان حد بحرانی پایین و بالا در نظر گرفته شدند.

تحلیل آماری داده‌ها

تمام محاسبه‌های موردنیاز در محیط نرم‌افزار اکسل و آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS 22 انجام شد. پهنه‌بندی با استفاده از روش کریجینگ معمولی در محیط نرم‌افزاری Arc GIS 10.6 صورت گرفت.

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک و عملکرد برنج در لندفرم‌های مختلف

خلاصه برخی آماره‌های توصیفی ویژگی‌های مؤثر در کیفیت خاک منطقه موردمطالعه در سه لندفرم در جدول ۱ ارائه شده است. درصد رس (۱۹/۵۰ درصد) و شن (۶۲/۴۵ درصد) شالیزارهای ساحلی به ترتیب کمتر و بیشتر از شالیزارهای دشت آبرفتی و کوهستان بود. شالیزارهای واقع در اراضی ساحلی به دلیل عقب‌نشینی دریا در طول زمان و انباشته شدن رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها و یا جریان‌های دریایی، درصد شن بالاتری نسبت به سایر مناطق دارند. مقدار EC در اراضی ساحلی ($۰/۵۵ \text{ dS m}^{-1}$) به دلیل تأثیر نفوذ آب دریا، از سایر مناطق بیشتر است (Dengiz, 2019). فعالیت آنزیمی در شالیزارهای کوهستان به دلیل حاصلخیزی بیشتر این مناطق (بالا بودن مقدار کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل‌استفاده) بیشتر از شالیزارهای اراضی ساحلی است (Li et al., 2013). میانگین عملکرد برنج در شالیزارهای کوهستان بیشتر ($۳/۵۱ \text{ t h}^{-1}$) از دشت آبرفتی ($۲/۲۶ \text{ t h}^{-1}$) و اراضی ساحلی ($۲/۰۱ \text{ t h}^{-1}$) بود. تغییرات عملکرد تابعی از خصوصیات ژنتیکی گیاه، ویژگی‌های خاک و عوامل مدیریت زراعی است و مجموعه این عوامل مختلف و اثرات متقابل آن‌ها منجر به تغییرپذیری عملکرد برنج در اراضی شالیزاری می‌گردد (Tian et al., 2020).

جدول ۱- خلاصه آماری ویژگی‌های خاکی و عملکرد برنج در لندفرم‌های مختلف

پارامتر	واحد	اراضی ساحلی		دشت آبرفتی		کوهستان	
		میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات
میانگین وزنی قطر خاکدانه	mm	۰/۰۷	۰/۰۳-۰/۱۴	۱/۴۷	۰/۳۱–۲/۵۸	۱/۸۷	۱/۸۷–۲/۸۲
جرم مخصوص ظاهری	mg m^{-3}	۱/۶۵	۱/۶۱-۱/۷۱	۱/۶۳	۱/۴۱–۱/۹۹	۱/۶۵	۱/۴۶–۱/۹۳
شن	$\text{g } 100\text{g}^{-1}$	۶۲/۴۵	۴۲/۴۰-۷۴/۲۰	۴۶/۲۴	۱۲/۲۰–۷۴/۲۰	۲۸/۲۳	۱۳/۶۰–۵۵/۶۰
رس	$\text{g } 100\text{g}^{-1}$	۱۹/۵۰	۷/۴۰-۳۶	۲۹/۳۲	۵/۴۰–۴۸/۴۰	۳۶/۰۶	۲۳/۰۰–۵۵/۰۰
سیلت	$\text{g } 100\text{g}^{-1}$	۱۸/۰۵	۷/۶۰-۲۵/۶۰	۲۴/۴۲	۷/۴۰–۴۹/۴۰	۳۵/۶۹	۱۱/۴۰–۴۷/۴۰
pH	-	۷/۶۳	۷/۳۰-۸/۰۴	۷/۲۳	۶/۲۰–۷/۷۷	۶/۸۲	۶/۲۷–۷/۴۳
EC	dS m^{-1}	۰/۵۵	۰/۲۳–۱/۴۱	۰/۴۰	۰/۲۲–۰/۸۴	۰/۳۸	۰/۱۲–۰/۶۱
کربن آلی	$\text{g } 100\text{g}^{-1}$	۱/۲۱	۰/۵۰-۱/۹۵	۱/۷۸	۰/۲۷–۳/۷۴	۲/۲۷	۰/۰۷–۳/۵۵
پتاسیم قابل‌استفاده	mg kg^{-1}	۱۱۱/۵۰	۴۸/۰۰ –۲۴۶/۰۰	۱۳۳/۹۹	۱۸/۰۰–۳۳۰/۰۰	۲۲۷/۸۰	۱۴۸/۰۰–۳۴۰/۰۰
فسفر قابل‌استفاده	mg kg^{-1}	۱۰	۴/۰۰–۱۸/۰۰	۱۱/۹۵	۴/۰۰–۴۰/۰۰	۱۹/۲۴	۱۲/۰۰–۴۸/۰۰
نیتروژن کل	$\text{g } 100\text{g}^{-1}$	۰/۰۷	۰/۰۴-۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۰۲–۰/۴۶	۰/۱۶	۰/۰۱–۰/۳۶
کربن زیست‌توده میکروبی	$\text{mgC } 100\text{g}^{-1}$	۵۹/۰۴	۲۴/۹۶-۱۲۸/۹۲	۸۳/۰۳	۱۸/۲۶–۲۹۹/۲۱	۱۳۵/۱۶	۸۳/۶۱–۲۸۶/۳۳
فسفر زیست‌توده میکروبی	$\mu\text{gP g}^{-1}$	۲۷/۷۰	۵/۷۳-۵۱/۰۲	۳۱/۵۶	۷/۹۱–۵۵/۳۸	۲۶/۸۳	۷/۰۲–۵۰/۵۰
نیتروژن زیست‌توده میکروبی	$\mu\text{gN g}^{-1}$	۵/۷۸	۰/۹۲-۱۲/۲۲	۷/۰۸	۰/۱۸–۲۱/۱۱	۱۲/۱۹	۹/۶۳–۲۰/۵۵
تنفس میکروبی	$\text{mgCO}_2\text{-C g}^{-1}{}_{\text{dry soil}}\text{ day}^{-1}$	۰/۵۴	۰/۰۸-۱/۶۲	۰/۸۸	۰/۱۷–۲/۴۳	۰/۵۷	۰/۰۹–۱/۱۶
فعالیت اوره‌آز	$\mu\text{gN-NH}_3\text{ g}_{\text{soil}}{}^{-1}\text{ 2h}^{-1}$	۱۰/۰۲	۵/۸۵–۱۴/۳۹	۱۴/۲۲	۴/۹۹–۳۵/۷۲	۱۷/۵۴	۴/۹۷–۳۰/۵۵
فعالیت فسفاتاز	$\mu\text{gPNP g}^{-1}{}_{\text{dry soil}}\text{ h}^{-1}$	۴۵/۹۶	۴/۱۴–۲۹۵/۴۷	۵۴/۹۰	۱/۹۱–۳۸/۶۴	۲۹۵/۲۴	۵۱/۵۱–۴۶۳/۳۵
عملکرد	t h^{-1}	۲/۰۱	۱/۳۳–۳/۵۰	۲/۲۶	۰/۴۵–۶/۳۰	۳/۵۱	۲/۲۵–۶/۳۳

ارزیابی کیفیت خاک

تعیین مجموعه حداقل داده (MDS)

با توجه با نتایج جدول ۲ ضریب KMO بزرگتر از ۰/۶ بدست آمد که نشان‌دهنده مناسب بودن داده‌های انتخاب‌شده برای PCA است بنابراین سایر ویژگی‌های خاک موردمطالعه از آنالیز بیشتر حذف شدند. در پژوهش حاضر مؤلفه‌های بدست آمده برای لندفرم‌های اراضی ساحلی، دشت آبرفتی و کوهستان به ترتیب توانستند ۸۸/۲۵، ۸۳/۵۹ و ۸۹/۵۱ درصد از تغییرات را نشان دهند (جدول ۳). در ادامه برای تعیین MDS، ابتدا پارامترهایی با ارزش ویژه بیشتر از ۰/۵ در هر PCA انتخاب شدند (Jiang et al., 2020; Tian et al., 2020) (جدول ۳) و مقادیر ارزش نرم ویژگی‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. سپس با مقایسه ضریب همبستگی بین ویژگی‌های خاکی در اراضی ساحلی، دشت آبرفتی و کوهستان، ویژگی‌های موردبررسی در شش گروه طبقه‌بندی شدند در هر گروه، ویژگی با بالاترین ارزش به عنوان MDS انتخاب شد. به این ترتیب در شالیزارهای ساحلی ویژگی‌های خاک شامل: ویژگی‌های درصد رس، کربن آلی، پتاسیم قابل‌استفاده، فسفر زیست‌توده میکروبی، فسفاتاز و تنفس میکروبی خاک، در شالیزارهای واقع در دشت آبرفتی؛ درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی، پتاسیم قابل‌استفاده، فعالیت فسفاتاز و تنفس میکروبی خاک و در شالیزارهای کوهستان؛ درصد رس، کربن آلی، پتاسیم قابل‌استفاده، فسفر زیست‌توده میکروبی، فعالیت فسفاتاز و تنفس میکروبی به عنوان MDS انتخاب شدند (جدول ۴ و ۵).

جدول ۲- نتایج آزمون KMO و کرویت بارتلت برای ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

اراضی ساحلی	مقدار KMO برای کفایت نمونه‌گیری		۰/۶۳۸
	آزمون کرویت بارتلت	تقریب کای-دو	۲۹۳/۹۶۴
		درجه آزادی	۵۵
		معنی‌داری	۰/۰۰۰
دشت آبرفتی	مقدار KMO برای کفایت نمونه‌گیری		۰/۷۱۷
	آزمون کرویت بارتلت	تقریب کای-دو	۶۴۲/۴۴۷
		درجه آزادی	۱۳۶
		معنی‌داری	۰/۰۰۰
کوهستان	مقدار KMO برای کفایت نمونه‌گیری		۰/۶۴۹
	آزمون کرویت بارتلت	تقریب کای-دو	۳۴۴/۸۶۱
		درجه آزادی	۹۱
		معنی‌داری	۰/۰۰۰

جدول ۳- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در لندفرم‌های مختلف

پارامتر	اراضی ساحلی				دشت آبرفتی					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
ارزش ویژه	۴/۰۹۷	۲/۹۸۳	۱/۴۱۷	۱/۲۱۱	۴/۸۷۳	۳/۴۵۸	۱/۸۴۵	۱/۴۸۳	۱/۴۱۰	۱/۱۴۳
درصد واریانس	۳۷/۲۴۷	۲۷/۱۲۱	۱۲/۸۸۱	۱۱/۰۰۸	۲۸/۶۶۶	۲۰/۳۴۰	۱۰/۸۵۱	۸/۷۲۶	۸/۷۲۶	۶/۷۲۲
درصد واریانس تجمعی	۳۷/۲۴۷	۶۴/۳۶۸	۷۷/۲۴۹	۸۸/۲۵۷	۲۸/۶۶۶	۴۹/۰۰۶	۵۹/۸۵۶	۶۸/۵۸۲	۶۸/۵۸۲	۸۳/۵۹۷
میانگین وزنی قطر خاکدانه					[a]**۰/۵۸۹**	۰/۰۴۵	-۰/۳۶۲	۰/۱۳۳	۰/۱۰۲	-۰/۳۹۵
جرم مخصوص ظاهری					۰/۳۶۴	۰/۰۳۷	۰/۰۰۵	۰/۱۶۸	**-۰/۷۸۱**	-۰/۰۶۳
شن					-۰/۳۲۵	-۰/۰۹۴	**-۰/۷۹۲**	-۰/۲۶۷	-۰/۰۰۹	۰/۱۲۲
رس	-۰/۴۲۷	۰/۰۳۶	۰/۴۰۷	**-۰/۵۹۷**	۰/۲۵۱	۰/۰۹۲	**۰/۸۷۹**	۰/۰۸۷	۰/۰۵۹	-۰/۰۲۱
pH					-۰/۴۹۳	-۰/۱۵۰	-۰/۰۵۹	-۰/۰۸۸	۰/۰۵۴	۰/۰۱۵
EC					۰/۱۲۴	۰/۲۶۰	۰/۰۵۷	۰/۰۴۷	۰/۴۰۵	۰/۰۸۴
کربن آلی	-۰/۰۷۳	**۰/۹۷۹**	۰/۰۹۹	-۰/۰۹۹	۰/۱۲۲	**۰/۹۳۹**	۰/۱۶۹	۰/۰۴۶	۰/۱۰۰	-۰/۰۳۸
نیتروژن کل	-۰/۰۸۲	**۰/۹۸۲**	۰/۱۲۳	-۰/۰۵۷	-۰/۰۴۳	**۰/۹۴۷**	۰/۰۹۵	-۰/۰۵۴	۰/۰۶۹	-۰/۰۷۴
پتاسیم قابل‌استفاده	**۰/۹۸۱**	-۰/۰۵۴	۰/۰۲۷	۰/۰۳۹	**۰/۹۵۵**	-۰/۱۱۰	۰/۱۷۷	-۰/۰۰۶	-۰/۰۵۳	۰/۰۵۰
فسفر قابل‌استفاده	**۰/۹۷۹**	-۰/۰۶۷	-۰/۰۳۱	۰/۰۹۷	**۰/۹۲۵**	-۰/۰۷۰	۰/۲۱۹	۰/۰۹۹	-۰/۰۳۲	۰/۰۰۸
کربن زیست‌توده میکروبی	**۰/۹۹۲**	-۰/۰۶۲	-۰/۰۱۱	-۰/۰۳۶	**۰/۹۵۹**	-۰/۰۳۷	۰/۱۸۱	۰/۰۴۳	-۰/۰۰۳	-۰/۰۲۱
فسفر زیست‌توده میکروبی	-۰/۱۰۸	۰/۲۲۲	**۰/۶۵۷**	-۰/۰۲۳	۰/۰۰۲	-۰/۰۳۵	۰/۲۰۶	**۰/۷۸۶**	-۰/۰۸۷	۰/۲۱۹
نیتروژن زیست‌توده میکروبی	**۰/۹۷۸**	-۰/۱۰۸	-۰/۰۶۴	-۰/۰۳۸	**۰/۹۳۹**	-۰/۰۶۴	۰/۱۸۶	-۰/۰۶۲	-۰/۱۰۶	۰/۰۸۶
تنفس میکروبی	-۰/۱۱۷	-۰/۱۱۰	۰/۱۵۵	**۰/۹۰۷**	۰/۱۱۷	۰/۱۱۰	۰/۰۵۲	**۰/۸۳۲**	-۰/۰۰۵	-۰/۲۴۹
اوره‌آز	-۰/۰۷۸	**-۰/۹۸۷**	۰/۱۰۲	-۰/۰۱۹	۰/۰۴۰	**۰/۹۶۸**	۰/۱۱۵	-۰/۰۰۴	۰/۱۳۴	-۰/۰۳۶
فسفاتاز	-۰/۱۰۸	-۰/۰۲۱	**-۰/۸۶۹**	-۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	-۰/۰۴۱	-۰/۱۱۵	-۰/۰۰۴	۰/۱۳۹	**۰/۹۰۹**

[a] **اعداد پررنگ به عنوان ویژگی‌هایی با ارزش ویژه بیشتر از ۰/۵ در PCA انتخاب شده‌اند.**

ادامه جدول ۳- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در لندفرم‌های مختلف

کوهستان	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
ارزش ویژه	۴/۰۸۶	۳/۲۵۳	۱/۹۴۵	۱/۷۶۳	۱/۴۸۵
درصد واریانس	۲۹/۱۸۴	۲۳/۲۳۴	۱۳/۸۹۳	۱۲/۵۹۴	۱۰/۶۰۵
درصد واریانس تجمعی	۲۹/۱۸۴	۵۲/۴۱۸	۶۶/۳۱۲	۷۸/۹۰۶	۸۹/۵۱۱
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۰۷۷	-۰/۱۵۸	**۰/۹۱۴**	۰/۱۲۲	-۰/۲۴۶
شن	۰/۱۲۵	-۰/۱۴۹	۰/۱۱۵	**-۰/۸۹۵**	-۰/۱۳۰
رس	۰/۱۲۲	۰/۰۴۷	۰/۳۷۵	**۰/۸۴۸**	-۰/۰۲۳
کرین آلی	۰/۲۱۷	**۰/۹۱۸**	۰/۰۸۱	۰/۱۰۷	۰/۲۰۵
نیتروژن کل	۰/۱۶۵	**۰/۹۳۱**	-۰/۰۸۴	۰/۰۶۰	۰/۱۵۳
پتاسیم قابل‌استفاده	**۰/۹۲۲**	۰/۰۵۷	۰/۰۵۳	۰/۱۹۹	-۰/۰۸۲
فسفر قابل‌استفاده	**۰/۹۲۴**	۰/۲۸۹	-۰/۱۶۶	-۰/۰۷۳	-۰/۰۷۰
کربن زیست‌توده میکروبی	**۰/۹۸۰**	۰/۱۳۴	۰/۰۱۷	۰/۰۳۲	-۰/۰۵۱
فسفر زیست‌توده میکروبی	۰/۴۰۸	-۰/۰۸۸	**۰/۶۳۷**	-۰/۱۲۸	۰/۴۱۷
نیتروژن زیست‌توده میکروبی	**۰/۹۶۷**	۰/۱۸۷	-۰/۰۲۰	۰/۰۲۱	-۰/۰۴۵
تنفس میکروبی	-۰/۲۰۸	۰/۲۱۳	-۰/۰۳۹	۰/۰۰۲	**۰/۸۷۰**
اوره‌آز	۰/۲۲۲	**۰/۹۵۷**	-۰/۰۲۴	۰/۰۹۰	۰/۰۹۶
فسفاتاز	-۰/۲۴۴	۰/۴۹۳	**۰/۷۰۶**	۰/۱۹۱	۰/۱۲۰

[a] **اعداد پررنگ به عنوان ویژگی‌هایی با ارزش ویژه بیشتر از ۰/۵ در PCA انتخاب شده‌اند.**

جدول ٤- مقدار نرم محاسبه‌شده با استفاده از ویژگی‌های لندفرم و خاک در اراضی ساحلی، دشت آبرفتی و کوهستان

ویژگی‌های خاک	مقدار نرم	R^2							
		ارتفاع	Ds	شیب	SPI	FD	Dr	TWI	مقدار نرم
اراضی ساحلی									
رس	۰/۸۵۰	۰/۰۷۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۳۴	۰/۰۴۴	۰/۰۷۳	۰/۰۷۸	۰/۷۱۳
اوره‌آز	۱/۷۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۴۱	۰/۰۱۱	۰/۲۰۶	۰/۰۵۹
نیتروژن کل	۱/۷۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۰۴	۰/۲۳۴	۰/۰۸۹
نیتروژن زیست‌توده میکروبی	۲/۰۰۴	۰/۰۹۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۶	۰/۹۰۱
فسفر قابل‌استفاده	۲/۰۰۳	۰/۱۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۱	۰/۲۰۴	۱/۰۰۰
کربن زیست‌توده میکروبی	۲/۰۱۶	۰/۰۹۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۶	۰/۹۱۱
پتاسیم قابل‌استفاده	۱/۷۰۴	۰/۰۵۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۲۶	۰/۰۴۸	۰/۰۰۷	۰/۵۷۴
فسفر زیست‌توده میکروبی	۲/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۳۶	۰/۰۰۴	۰/۰۴۹	۰/۱۷۸	۰/۰۱۰
تنفس میکروبی	۱/۰۴۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۳۹	۰/۰۰۸	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰
کربن آلی	۱/۷۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۶۳	۰/۰۰۵	۰/۲۳۷	۰/۰۳۰
فسفاتاز	۱/۱۰۹	۰/۰۱۸	۰/۰۴۱	۰/۰۰۰	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۰۳۶	۰/۰۳۱	۰/۱۷۸
دشت آبرفتی									
میانگین وزنی قطر خاکدانه	۱/۳۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۹۹	۰/۰۴۰	۰/۱۳۳	۰/۱۱۸	۰/۶۱۴
جرم مخصوص ظاهری	۰/۹۲۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳	۰/۴۳۸
شن	۱/۰۷۶	۰/۰۵۷	۰/۰۴۴	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۵۰۸
رس	۱/۱۹۴	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۰/۰۸۰	۰/۰۰۲	۰/۰۶۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۵۶۴
کربن آلی	۱/۷۴۶	۰/۴۰۱	۰/۴۷۳	۰/۱۶۴	۰/۲۸۱	۰/۰۰۳	۰/۱۰۱	۰/۰۰۰	۰/۸۲۴
نیتروژن کل	۱/۷۶۲	۰/۳۳۳	۰/۳۷۸	۰/۱۵۴	۰/۱۹۳	۰/۰۳۴	۰/۱۰۴	۰/۰۰۲	۰/۸۳۲
کربن زیست‌توده میکروبی	۲/۱۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۵۳	۰/۰۱۷	۰/۰۱۲	۰/۰۴۹	۰/۰۴۱	۰/۰۳۶	۰/۹۹۶
فسفر قابل‌استفاده	۲/۰۴۲	۰/۰۲۷	۰/۰۸۸	۰/۰۱۱	۰/۰۳۳	۰/۰۲۱	۰/۰۵۱	۰/۰۲۶	۰/۹۶۴
پتاسیم قابل‌استفاده	۲/۱۱۸	۰/۰۲۰	۰/۰۹۳	۰/۰۰۸	۰/۰۲۲	۰/۰۳۹	۰/۰۵۴	۰/۰۳۰	۱/۰۰۰

Ds ؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا دریا، SPI؛ شاخص قدرت جریان، FD؛ جهت جریان، Dr؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا رودخانه، TWI؛ شاخص خیسی توپوگرافی، MDS؛ حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک.

ادامه جدول ٤- مقدار نرم محاسبه‌شده با استفاده از ویژگی‌های لندفرم و خاک در اراضی ساحلی، دشت آبرفتی و کوهستان

دشت آبرفتی	مقدار نرم	R^2							
		ارتفاع	Ds	شیب	SPI	FD	Dr	TWI	مقدار نرم
نیتروژن زیست‌توده میکروبی	۲/۰۷۳	۰/۰۱۹	۰/۰۶۱	۰/۰۲۷	۰/۰۳۰	۰/۰۳۲	۰/۰۳۰	۰/۰۲۲	۰/۹۷۹
فسفر زیست‌توده میکروبی	۰/۹۵۷	۰/۰۳۲	۰/۰۲۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۴۵۲
فسفاتاز	۰/۹۷۲	۰/۰۵۵	۰/۰۱۷	۰/۰۴۶	۰/۰۰۹	۰/۱۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۳	۰/۴۵۹
اوره‌آز	۱/۸۰۰	۰/۴۲۶	۰/۳۱۲	۰/۰۷۴	۰/۲۲۸	۰/۰۳۰	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۸۵۰
تنفس میکروبی	۱/۰۱۳	۰/۰۶۳	۰/۰۶۱	۰/۱۸۳	۰/۰۹۶	۰/۱۲۸	۰/۰۰۰	۰/۱۰۷	۰/۴۷۸
کوهستان									
رس	۱/۲۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۲۵	۰/۲۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۵۳	۰/۶۴۳
شن	۱/۱۸۹	۰/۰۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۰۴	۰/۰۵۶	۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۰۷۶	۰/۶۰۰
جرم مخصوص ظاهری	۱/۱۲۶	۰/۰۴۴	۰/۰۲۳	۰/۰۵۵	۰/۰۰۸	۰/۳۰۴	۰/۰۳۷	۰/۰۰۰	۰/۵۶۹
کربن آلی	۱/۶۵۵	۰/۰۲۳	۰/۰۱۲	۰/۰۶۵	۰/۱۶۴	۰/۰۰۲	۰/۰۴۵	۰/۰۵۶	۰/۸۳۵
نیتروژن کل	۱/۶۷۹	۰/۰۲۰	۰/۰۰۹	۰/۰۴۵	۰/۰۸۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۰	۰/۰۴۳	۰/۸۴۷
پتاسیم قابل‌استفاده	۱/۸۹۰	۰/۰۲۵	۰/۱۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۲۷	۰/۰۰۳	۰/۰۹۵	۰/۹۵۴
فسفر قابل‌استفاده	۱/۸۶۷	۰/۰۰۲	۰/۰۸۲	۰/۰۰۲	۰/۰۵۸	۰/۰۰۸	۰/۰۱۰	۰/۰۷۶	۰/۹۴۲
کربن زیست‌توده میکروبی	۱/۹۸۱	۰/۰۱۵	۰/۱۱۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۶۲	۱/۰۰۰
نیتروژن زیست‌توده میکروبی	۱/۹۵۴	۰/۰۰۸	۰/۰۹۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۰۲۶	۰/۰۴۵	۰/۹۸۶
فسفر زیست‌توده میکروبی	۰/۸۸۸	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۵۴	۰/۰۵۸	۰/۰۰۸	۰/۰۷۳	۰/۰۰۰	۰/۴۴۸
فسفاتاز	۱/۲۷۳	۰/۰۷۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۳	۰/۲۴۷	۰/۰۲۰	۰/۰۷۰	۰/۶۴۳
اوره‌آز	۱/۳۳۵	۰/۰۲۷	۰/۰۱۵	۰/۰۲۶	۰/۱۶۵	۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۷	۰/۶۷۴
تنفس میکروبی	۱/۰۶۰	۰/۰۳۷	۰/۰۸۸	۰/۲۲۸	۰/۰۸۹	۰/۰۲۰	۰/۱۴۶	۰/۰۰۵	۰/۵۳۵

Ds؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا دریا، SPI؛ شاخص قدرت جریان، FD؛ جهت جریان، Dr؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا رودخانه، TWI؛ شاخص خیسی توپوگرافی، MDS؛ حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک.

جدول ٥- حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب‌شده با استفاده از مقدار نرم و ارزش ویژگی‌های لندفرم و خاک در اراضی ساحلی، دشت آبرفتی و کوهستان

گروه	ویژگی‌های خاک اراضی ساحلی	Normal Transformation								
		ارتفاع	Ds	شیب	SPI	FD	Dr	TWI	ارزش ویژگی‌ها	MDS
۶	رس	۰/۲۲۰	۰/۲۲۰	۰/۰۰۰	۰/۷۷۳	۰/۶۹۸	۱/۰۰۰	۰/۳۲۹	۳/۹۵۲	MDS
۳	اوره‌آز	۰/۳۴۱	۰/۳۴۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۶۵۱	۰/۱۵۱	۰/۸۶۹	۲/۴۱۳	
۳	نیتروژن کل	۰/۲۶۸	۰/۲۶۸	۰/۰۰۰	۰/۱۱۴	۰/۵۲۴	۰/۰۵۵	۰/۹۸۷	۲/۳۰۵	
۵	نیتروژن زیست‌توده میکروبی	۰/۲۲۰	۰/۲۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۳	۰/۰۱۶	۰/۲۸۸	۰/۰۶۸	۱/۷۳۴	
۵	فسفر قابل‌استفاده	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۲۵	۰/۸۶۱	۲/۲۸۵	
۵	کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۳۶۶	۰/۳۶۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۸۶	۰/۲۷۴	۰/۰۶۸	۲/۲۷۰	
۵	پتاسیم قابل‌استفاده	۰/۵۶۱	۰/۵۶۱	۰/۰۰۰	۰/۰۶۸	۰/۴۱۳	۰/۶۵۸	۰/۰۳۰	۲/۸۶۴	MDS
۴	فسفر زیست‌توده میکروبی	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۰۰	۰/۸۱۸	۰/۰۶۳	۰/۶۷۱	۰/۷۵۱	۲/۳۶۳	MDS
۲	تنفس میکروبی	۰/۲۲۰	۰/۲۲۰	۰/۰۰۰	۱/۱۳۶	۰/۶۱۹	۰/۱۱۰	۰/۱۹۰	۲/۴۹۴	MDS
۳	کربن آلی	۰/۳۶۶	۰/۳۶۶	۰/۰۰۰	۰/۰۹۱	۱/۰۰۰	۰/۰۶۸	۱/۰۰۰	۲/۹۲۱	MDS
۱	فسفاتاز	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۷۱۴	۰/۴۹۳	۰/۱۳۱	۴/۵۱۶	MDS
	ویژگی‌های خاک دشت آبرفتی									
۵	میانگین وزنی قطر خاکدانه	۰/۰۴۲	۰/۰۵۷	۰/۰۹۳	۰/۳۵۲	۰/۳۱۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۳/۴۷۱	MDS
۵	جرم مخصوص ظاهری	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۱۱۵	۰/۰۲۵	۰/۰۳۹	۰/۱۰۵	۰/۰۲۵	۰/۷۴۹	
۴	شن	۰/۱۳۴	۰/۰۹۳	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۸۴۰	
۴	رس	۰/۰۲۱	۰/۰۲۵	۰/۴۳۷	۰/۰۰۷	۰/۵۲۳	۰/۰۹۰	۰/۱۲۷	۱/۷۹۵	MDS
۳	کربن آلی	۰/۹۴۱	۱/۰۰۰	۰/۸۹۶	۱/۰۰۰	۰/۰۲۳	۰/۷۵۹	۰/۰۰۰	۵/۴۴۴	MDS
۳	نیتروژن کل	۰/۷۸۲	۰/۷۹۹	۰/۸۴۲	۰/۶۸۷	۰/۲۶۶	۰/۷۸۲	۰/۰۱۷	۵/۰۰۶	
۶	کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۰۲۱	۰/۱۱۲	۰/۰۹۳	۰/۰۴۳	۰/۳۸۳	۰/۳۰۸	۰/۳۰۵	۲/۲۶۰	
۶	فسفر قابل‌استفاده	۰/۰۶۳	۰/۱۸۶	۰/۰۶۰	۰/۱۱۷	۰/۱۶۴	۰/۳۸۳	۰/۲۲۰	۲/۱۵۹	
۶	پتاسیم قابل‌استفاده	۰/۰۴۷	۰/۱۹۷	۰/۰۴۴	۰/۰۷۸	۰/۳۰۵	۰/۴۰۶	۰/۲۵۴	۲/۳۳۰	MDS

Ds؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا دریا، SPI؛ شاخص قدرت جریان، FD؛ جهت جریان، Dr؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا رودخانه، TWI؛ شاخص خیسی توپوگرافی، MDS؛ حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک.

ادامه جدول ۵- حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب‌شده با استفاده از مقدار نرم و ارزش ویژگی‌های لندفرم و خاک در اراضی ساحلی، دشت آبرفتی وکوهستان

گروه	ویژگی‌های خاک دشت آبرفتی	Normal Transformation							ارزش ویژگی‌ها	MDS
		ارتفاع	Ds	شیب	SPI	FD	Dr	TWI		
۶	نیتروژن زیست‌توده میکروبی	۰/۰۴۵	۰/۱۲۹	۰/۱۴۸	۰/۱۰۷	۰/۲۵۰	۰/۲۲۶	۰/۱۸۶	۲/۰۶۹	
۱	فسفر زیست‌توده میکروبی	۰/۰۷۵	۰/۰۵۷	۰/۰۴۴	۰/۰۱۱	۰/۰۲۳	۰/۰۵۳	۰/۰۱۷	۰/۷۳۲	
۱	فسفاتاز	۰/۱۲۹	۰/۰۳۶	۰/۲۵۱	۰/۰۳۲	۰/۸۲۸	۰/۱۱۳	۰/۰۲۵	۱/۸۷۴	MDS
۳	اوره‌آز	۱/۰۰۰	۰/۶۶۰	۰/۴۰۴	۰/۸۱۱	۰/۲۳۴	۰/۳۲۳	۰/۰۰۰	۴/۲۸۳	
۲	تنفس میکروبی	۰/۱۴۸	۰/۱۲۹	۱/۰۰۰	۰/۳۴۲	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۰۷	۰/۰۰۴	MDS
	ویژگی‌های خاک کوهستان									
۱	رس	۱/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۰۳۵	۰/۱۵۲	۰/۶۹۱	۰/۰۲۷	۰/۶۹۷	۳/۲۸۷	MDS
۱	شن	۰/۰۰۰	۰/۲۹۴	۰/۰۱۸	۰/۳۳۹	۰/۱۴۱	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۲/۳۹۳	
۱	جرم مخصوص ظاهری	۰/۵۹۰	۰/۱۹۳	۰/۲۴۱	۰/۰۴۸	۱/۰۰۰	۰/۲۵۳	۰/۰۰۰	۲/۹۰۰	
۴	کربن آلی	۰/۳۱۰	۰/۱۰۱	۰/۲۸۵	۰/۹۹۴	۰/۰۰۷	۰/۳۰۸	۰/۷۳۷	۳/۵۷۷	MDS
۴	نیتروژن کل	۰/۲۷۰	۰/۰۷۶	۰/۱۹۷	۰/۴۹۱	۰/۰۲۶	۰/۰۶۸	۰/۵۶۶	۲/۵۴۲	
۳	پتاسیم قابل‌استفاده	۰/۳۴۰	۰/۹۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۰۸۹	۰/۰۲۱	۱/۲۵۰	۳/۵۶۳	MDS
۳	فسفر قابل‌استفاده	۰/۰۳۰	۰/۶۸۹	۰/۰۰۹	۰/۳۵۲	۰/۰۲۶	۰/۰۶۸	۱/۰۰۰	۳/۱۱۳	
۳	کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۲۰۲	۱/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	۰/۰۷۲	۰/۱۴۴	۰/۸۱۶	۳/۲۷۶	
۳	نیتروژن زیست‌توده میکروبی	۰/۱۱۰	۰/۷۷۳	۰/۰۲۲	۰/۰۵۵	۰/۰۳۳	۰/۱۷۸	۰/۵۹۲	۲/۷۴۷	
۲	فسفر زیست‌توده میکروبی	۰/۲۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۳۷	۰/۳۵۲	۰/۰۲۶	۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	۱/۷۶۵	MDS
۶	فسفاتاز	۰/۹۶۰	۰/۲۲۷	۰/۰۶۶	۰/۰۱۸	۰/۸۱۳	۰/۱۳۷	۰/۹۲۱	۳/۷۸۴	MDS
۴	اوره‌آز	۰/۳۶۰	۰/۱۲۶	۰/۱۱۴	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۸۲	۰/۶۱۸	۲/۹۸۰	
۵	تنفس میکروبی	۰/۵۰۰	۰/۷۳۹	۱/۰۰۰	۰/۵۳۹	۰/۰۶۶	۱/۰۰۰	۰/۰۶۶	۴/۴۴۵	MDS

Ds؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا دریا، SPI؛ شاخص قدرت جریان، FD؛ جهت جریان، Dr؛ فاصله نقاط نمونه‌برداری تا رودخانه، TWI؛ شاخص خیسی توپوگرافی، MDS؛ حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک.

تعیین حدود بحرانی MDS در لندفرم‌های مختلف

حدود بالا و پایین ویژگی‌های MDS بر اساس رابطه رگرسیونی هر یک از ویژگی‌های MDS با عملکرد نسبی برنج تعیین شد. روابط رگرسیونی برای لندفرم‌های موردبررسی در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.

حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در اراضی ساحلی

رابطه رگرسیونی ویژگی‌های MDS با عملکرد نسبی برنج در اراضی ساحلی (شکل ۲) نشان داد که بالاترین ضریب تبیین مربوط به پتاسیم قابل‌استفاده و فسفر زیست‌توده میکروبی (R^2 =۰/۸۷) می‌باشد. حدود بحرانی پایین و بالا برای پتاسیم قابل‌استفاده به ترتیب $mg\ kg^{-1}$ ۱۲۲و ۲۸۱ و برای فسفر زیست‌توده میکروبی به ترتیب$\mu gP\ g^{-1}$ ۲۵ و ۶۸ به‌دست آمد.

حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در دشت آبرفتی

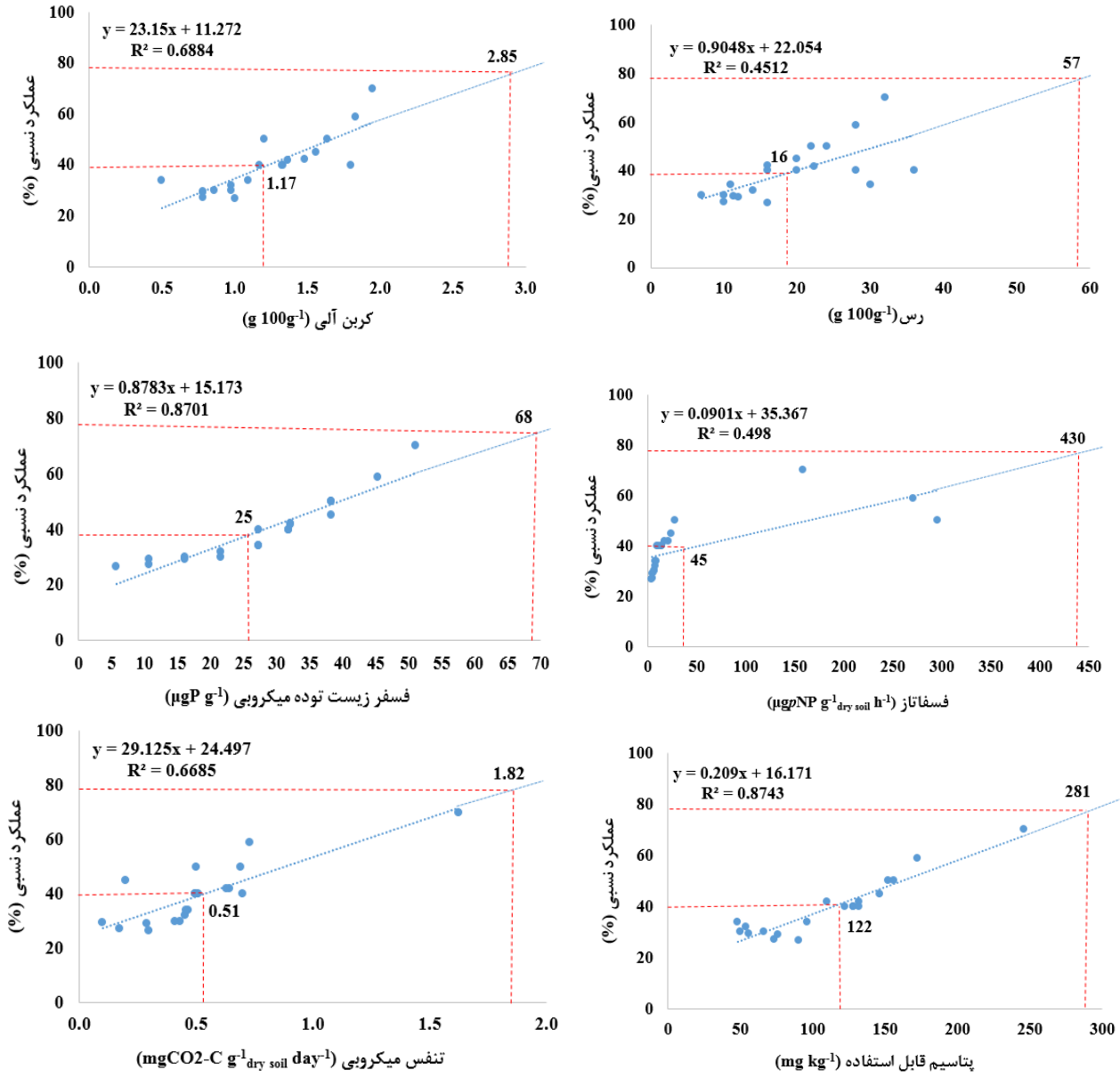
رابطه رگرسیونی ویژگی‌های MDS با عملکرد نسبی برنج در دشت آبرفتی (شکل ۳) نشان داد که بالاترین ضریب تبیین مربوط به پتاسیم قابل‌استفاده (R^2 =۰/۸۵) و تنفس میکروبی (R^2 =۰/۸۳) می‌باشد. حدود بحرانی پایین و بالا برای پتاسیم قابل‌استفاده به ترتیب $mg\ kg^{-1}$ ۱۲۰و ۳۰۰ و برای تنفس میکروبی به ترتیب $mgCO_2\text{-}C\ g^{-1}{}_{dry\ soil}$ ۰/۷۵ و ۱/۶ به‌دست آمد.

حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در کوهستان

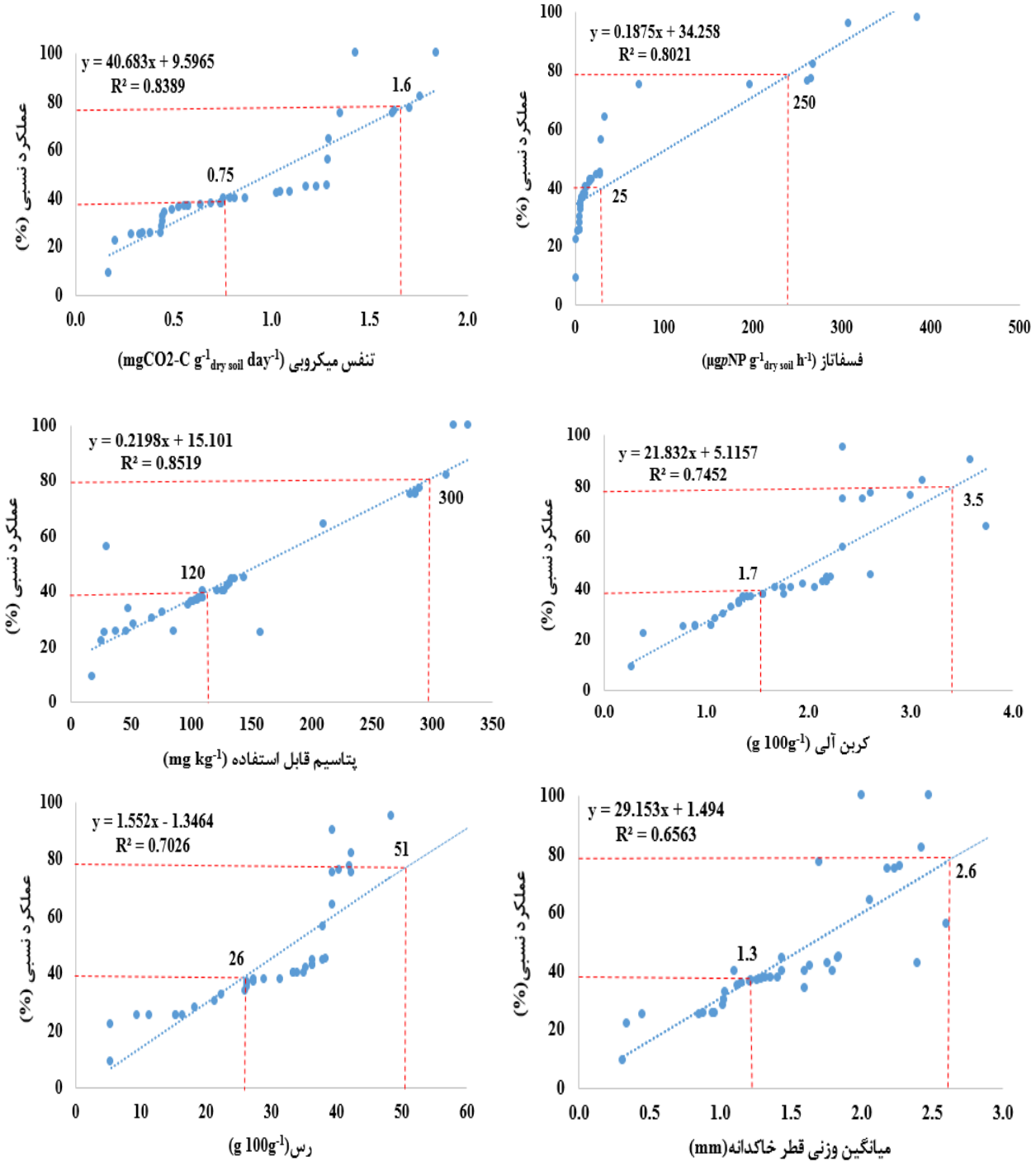
رابطه رگرسیونی ویژگی‌های MDS با عملکرد نسبی برنج در کوهستان (شکل ۴) نشان داد که پتاسیم قابل‌استفاده (R^2 =۰/۹۰) و فسفر زیست‌توده میکروبی (R^2 =۰/۸۸) بالاترین ضریب تبیین را داشتند. حدود بحرانی پایین و بالا برای پتاسیم قابل‌استفاده به ترتیب $mg\ kg^{-1}$ ۱۱۰ و ۲۷۵ و برای فسفر زیست‌توده میکروبی به ترتیب $\mu gP\ g^{-1}$ ۴ و ۳۸ بدست آمد.

بررسی رابطه رگرسیونی هر یک از ویژگی‌های MDS با عملکرد نسبی برنج در لندفرم‌های مختلف نشان داد که پتاسیم قابل‌استفاده بالاترین ضریب تبیین را در هر سه لندفرم به خود اختصاص داد. درصد رس، کربن آلی، پتاسیم قابل‌استفاده، تنفس میکروبی خاک و فسفاتاز

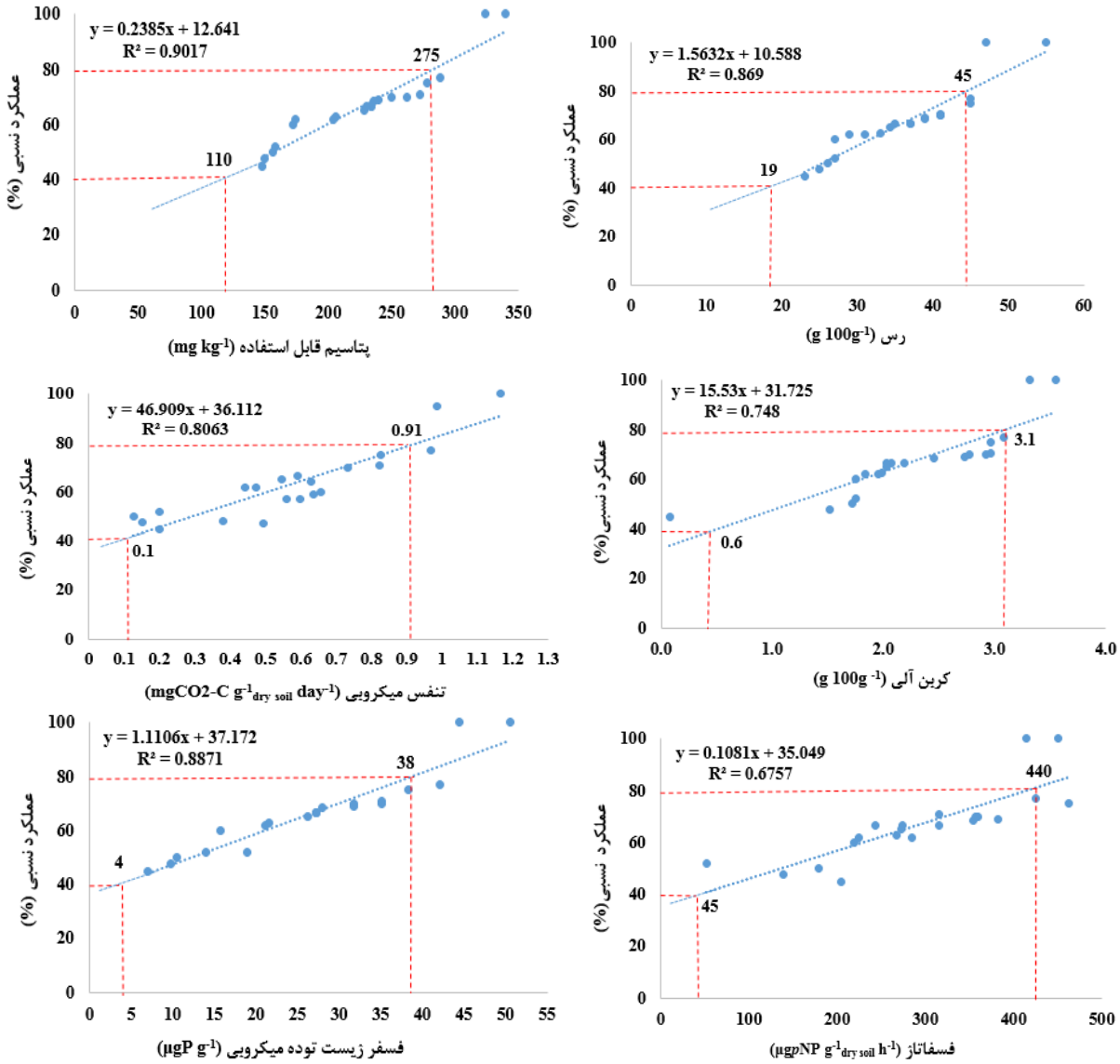
جزء مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و عملکرد محصول در هر سه لندفرم بودند. Dengiz, (2019) گزارش کردند که درصد رس و کربن آلی نقش مهمی در تعیین کیفیت خاک اراضی شالیزاری ایفا می‌کند. این ویژگی‌ها تأثیر مستقیمی بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند که به نوبه خود بر عملکرد محصولات زراعی تأثیر می‌گذارد. کربن آلی به عنوان منبع غذایی برای میکروارگانیسم‌های خاک عمل می‌کند و باعث رشد و فعالیت آن‌ها می‌شود. این میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی در چرخه مواد مغذی و تجزیه مواد آلی دارند و مواد مغذی را آزاد می‌کنند که برای رشد گیاه ضروری هستند (Samaei et al., 2022). وجود رس و کربن آلی در خاک شالیزاری بر فعالیت آنزیم‌های خاک تأثیر مثبت دارد. آنزیم‌های خاک کاتالیست‌هایی هستند که واکنش‌های بیوشیمیایی مختلف از جمله تجزیه مواد آلی را تسهیل می‌کنند (Bahkshandeh et al., 2019). هم‌سو با پژوهش ما دیگر پژوهشگران (Wickings et al. 2016; Sarapatka et al. 2018; Raiesi et al., 2022) افزایش فعالیت آنزیمی در حضور خاک رسی و کربن آلی را گزارش کرده‌اند که منجر به بهبود دسترسی مواد مغذی برای گیاهان، افزایش رشد آن‌ها و در نهایت افزایش عملکرد محصول می‌شود.



شکل ۲- حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در اراضی ساحلی



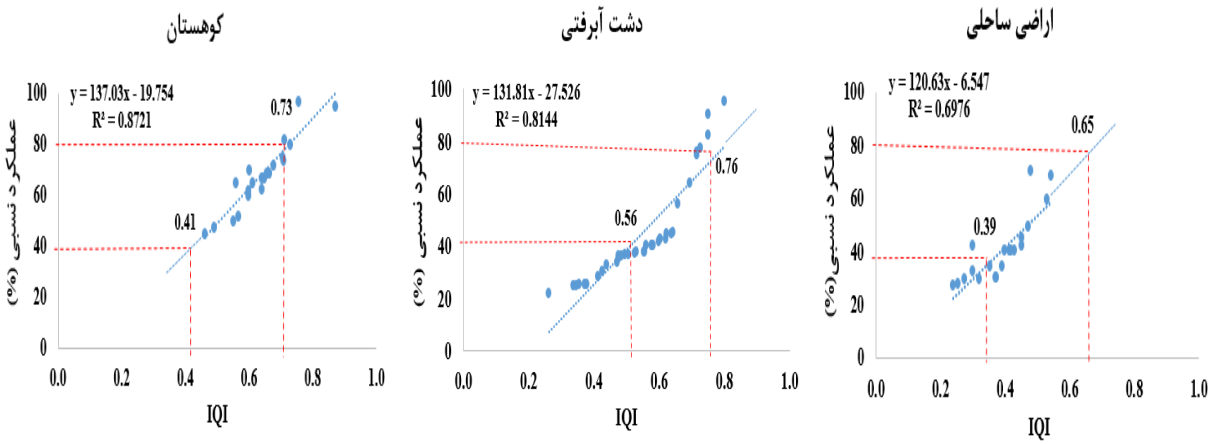
شکل ۳- حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در دشت آبرفتی



شکل ٤- حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در کوهستان

حدود بحرانی شاخص کیفیت خاک در لندفرم‌های مختلف

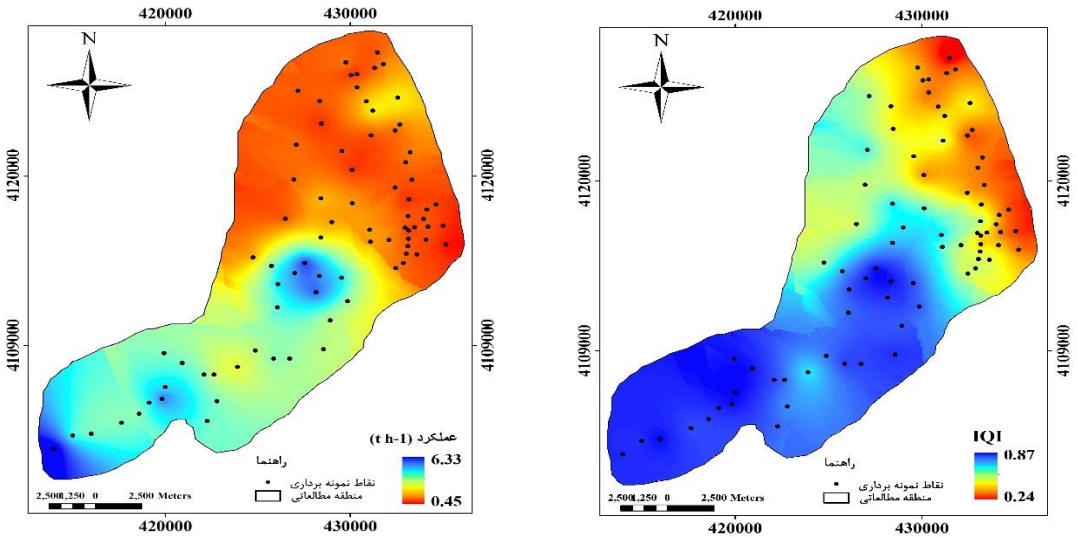
رابطه رگرسیونی شاخص‌های کیفیت خاک با عملکرد نسبی برنج در لندفرم‌های مختلف در شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفت. حد پایین و بالای شاخص کیفیت خاک در اراضی ساحلی به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۶۵، در دشت آبرفتی ۰/۵۶ و ۰/۷۶ و در کوهستان ۰/۴۱ و ۰/۷۳ برای رسیدن به ۴۰ و ۸۰ درصد عملکرد نسبی به‌دست آمد. حدود بحرانی شاخص کیفیت خاک به روشنی نشان می‌دهد که پتانسیل قابل‌توجه‌ای برای افزایش تولید برنج در شالیزارهای هر سه لندفرم وجود دارد. همچنین ضریب تبیین بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد نسبی در شالیزارهای کوهستان بیشترین مقدار را دارا بوده و توانسته ۸۷ درصد از تغییرات عملکرد برنج را نشان دهد. Tian et al. (2020) گزارش کردند که شاخص کیفیت خاک به‌دست آمده با استفاده از مقادیر نرم ویژگی‌ها همبستگی بالایی با عملکرد برنج دارد. Rezaee et al. (2020) با ارزیابی کیفیت خاک در شالیزارهای شمال ایران دریافتند که شاخص کیفیت خاک ۵۰ درصد از تغییرات عملکرد برنج را توضیح می‌دهد. Hemmati et al. (2023) گزارش کردند که شاخص کیفیت خاک می‌تواند حدود نیمی از تغییرات عملکرد برنج در شالیزارهای مرکزی استان گیلان را نشان دهد.



شکل ۵- حدود بحرانی شاخص کیفیت خاک در لندفرم‌های مختلف

پهنه‌بندی شاخص کیفیت خاک و عملکرد محصول

نقشه توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج در شکل ۶ نشان داده شده است. ژنوتیپ گیاه، آب و هوا، ویژگی‌های خاک، مدیریت و ویژگی‌های لندفرم‌ها بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد (Derakhshan-Babaei et al., 2021; Jiang et al., 2020). بنابراین، تغییرات در این عوامل می‌تواند منجر به عملکرد متفاوت برنج در مناطق مختلف شود. عملکرد برنج در اراضی ساحلی به دلیل مجاورت با دریای خزر تحت تأثیر سیل، زهکشی ضعیف و شوری آب دریا است. درصد بالای مقدار شن در اراضی ساحلی و دشت آبرفتی باعث آبشویی عناصر غذایی از خاک می‌شود. عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم برای رشد و نمو گیاهان حیاتی هستند و تامین ناکافی آن‌ها می‌تواند عملکرد را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. در نتیجه کشاورزان نیاز به مصرف کود بیشتری داشته که این امر هزینه تولید را افزایش می‌دهد. میانگین عملکرد برنج در شالیزارهای کوهستان (۳/۵۱ $t\ h^{-1}$) بیشتر از شالیزارهای اراضی ساحلی و دشت آبرفتی (به ترتیب ۲/۰۱ $t\ h^{-1}$ و ۲/۲۶) می‌باشد (شکل ۶ و جدول ۱). عملکرد محصول، به عنوان فاکتور زیستی گیاه برای پاسخ مستقیم به ویژگی‌های خاک به حساب آمده و تأثیر عواملی که ارتباط مستقیمی با کیفیت خاک ندارند را به حداقل می‌رساند. بنابراین، عملکرد محصول به عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی کیفیت خاک پیشنهاد شده است (Li et al., 2019). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ویژگی‌های اصلی مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) نقش بسزایی در کارکردهای مختلف خاک و تولید برنج دارند. بنابراین تعیین حدود بحرانی ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک به عنوان تابعی از عملکرد نسبی برنج، برای بهبود شیوه‌های مدیریتی و بهره‌وری پایدار اراضی شالیزاری امری بسیار مهم است.



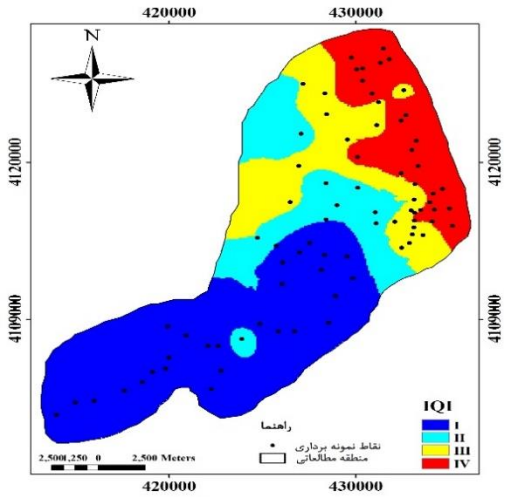
شکل ٦- پهنه‌بندی شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج

کلاس‌بندی شاخص کیفیت خاک

شاخص کیفیت خاک منطقه مطالعاتی بر اساس کلاس‌بندی Qi et al. (2009) در جدول ۶ ارائه شده است. مناطق با کلاس کیفیت خاک I، II، III و IV به ترتیب ۳۵، ۱۱/۲۵، ۲۳/۷۵ و ۳۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص دادند. شالیزارهای کوهستان با بیشترین میانگین IQI در کلاس I و II قرار گرفتند (شکل ۷). شالیزارهای واقع در اراضی ساحلی از کمترین میانگین IQI برخوردار بوده و در کلاس IV قرار گرفتند. بالا بودن درصد کربن آلی و مقادیر کمتر درصد شن در شالیزارهای کوهستان (جدول ۱) می‌تواند از عوامل تأثیرگذار بر بهبود شاخص کیفیت خاک در این مناطق باشد. امامی و همکاران (۱۳۹۳) دریافتند که با افزودن مواد آلی، کلاس کیفیت خاک یک تا دو درجه و از درجه IV به درجه III و II افزایش می‌یابد. Derakhshan-Babaei et al. (2021) در پژوهشی بیان کردند درصد شن و کربن آلی نقش مهم‌تری نسبت به سایر خواص خاک بر روی کیفیت خاک دارند، بنابراین افزایش کربن آلی خاک می‌تواند با بهبود سایر ویژگی‌های خاک، بهبود کیفیت خاک را به همراه داشته باشد.

جدول ٦-کلاس‌بندی شاخص کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه

	کلاس‌بندی کیفیت خاک	میانگین شاخص کیفیت خاک	مساحت (%)
I	≥ ۰/۷۸	۰/۷۸	۳۵
II	۰/۷۸ ≥ IQI ≥ ۰/۶۸	۰/۷۰	۱۱/۲۵
III	۰/۶۸ ≥ IQI ≥ ۰/۵۸	۰/۶۰	۲۳/۷۵
IV	۰/۵۸ >	۰/۴۱	۳۰



شکل ۷- کلاس‌بندی شاخص کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

یکی از ابزارهای مدیریت اراضی و بهبود بهره‌وری خاک بررسی ویژگی‌های تأثیرگذار بر کیفیت خاک و عملکرد محصول می‌باشد. پژوهش حاضر تأثیر ویژگی‌های زمین بر حدود بحرانی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در لندفرم‌های مختلف را مورد بررسی قرار داد. درصد رس، کربن آلی، پتاسیم قابل‌استفاده، تنفس میکروبی خاک و فسفاتاز مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و عملکرد محصول در هر سه لندفرم می‌باشند. ارزیابی ارتباط هر یک از ویژگی‌های MDS با عملکرد نسبی برنج در لندفرم‌های مختلف نشان داد که پتاسیم قابل‌استفاده بالاترین ضریب تبیین در هر سه لندفرم را به خود اختصاص داده است. همچنین ضریب تبیین بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد نسبی در شالیزارهای کوهستان بیشترین مقدار را دارا بوده و توانسته ۸۷ درصد از تغییرات عملکرد برنج را نشان دهد. شالیزارهای کوهستان با بیشترین مقدار IQI در کلاس کیفیت خاک I و II قرار گرفتند. بالا بودن درصد کربن آلی و مقادیر کمتر درصد شن در این شالیزارها می‌تواند از عوامل تأثیرگذار بر بهبود شاخص کیفیت خاک در این مناطق باشد. میانگین عملکرد برنج در شالیزارهای کوهستان (۳/۵۱ $t\ h^{-1}$) بیشتر از دشت آبرفتی (۲/۲۶ $t\ h^{-1}$) و اراضی ساحلی (۲/۰۱ $t\ h^{-1}$) بوده است. عملکرد کمتر شالیزارهای ساحلی می‌تواند به دلیل بافت سبک

خاک و نزدیکی به دریای خزر باشد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ویژگی‌های اصلی مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) نقش بسزایی در کارکردهای مختلف خاک و تولید برنج دارند. به منظور بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد در شالیزارها، توصیه می‌شود شیوه‌های مدیریت خاک بر اساس ویژگی‌های زمین و حدود بحرانی ویژگی‌های MDS در نظر گرفته شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

امامی، حجت؛ آستارایی، علیرضا و فتوت، امیر. (۱۳۹۳). ارزیابی تأثیر مواد آلی بر توابع نمره‌دهی کیفیت خاک. *آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد*. ۲۸ (۳). ۵۷۴-۵۶۵.

REFERENCES

Anderson, J.P.E. (1982). Soil Respiration. In A. L. Page, et al. (Eds.). Methods of Soil Analysis: 2nd ed. Part 2. *American Society of Agronomy*. (pp. 831-872). U.S.A.

Askari, M.S. & Holden N.M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. Soil and Tillage Research, 150, 57-67. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010.

Bakhshandeh, E., Hossieni, M., Zeraatpisheh, M. & Francaviglia, R. (2019). Land use change effects on soil quality and biological fertility: a case study in northern Iran. *European Journal of Soil Biology*, 95, 103119. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2019.103119.

Barah, B.C. & Pandey, S. (2005). Rainfed Rice Production Systems in Eastern India: An On-Farm Diagnosis and Policy Alternatives. *Indian journal of agricultural Economics*, 60(1), 110-136. https://doi.10.22004/ag.econ.204391.

Bi, C. J., Chen, Z. L., Wang, J. & Zhou, D. (2013). Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types. *Pedosphere*, 23(2), 194-204. 10.1016/S1002-0160(13)60007-7.

Biswas, S., Hazra, G.C., Purakayastha, T.J., Saha, N., Mitran, T., Roy, S.S., Basak, N. & Mandal, B. (2017). Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma*, 292, 34–48. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.003.

Blake, G.R. & Hartage, K.H. (1986). Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), Method of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: *Agronomy Monograph* no. 9, second ed., pp. 363–375. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13.

Brookes, P.C., Powlson, D.S. & Jenkinson, D.S. (1982). Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil biology and biochemistry*. 14: 319-329. https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90001-3.

Carter, M.R. & Gregorich, E.G. (2000). Soil sampling and methods of analysis. CRC press. 499-511.

Choudhury, B. U. & Mandal, S. (2021). Indexing soil properties through constructing minimum datasets for soil quality assessment of surface and profile soils of intermontane valley (Barak, North East India). *Ecological Indicators*, 123, 107369. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107369.

Choudhury, B. U., & Mandal, S. (2021). Indexing soil properties through constructing minimum datasets for soil quality assessment of surface and profile soils of intermontane valley (Barak, North East India). *Ecological Indicators*, 123, 107369. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107369.

Congreves, K. A., Hayes, A., Verhallen, E. A. & Van Eerd, L. L. (2015). Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152, 17-28. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.012.

Dengiz, O. (2019). Soil quality index for paddy fields based on standard scoring functions and weight allocation method. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(3), 301-315. https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1610880.

Derakhshan-Babaei, F., Nosrati, K., Mirghaed, F. A. & Egli, M. (2021). The interrelation between landform, land-use, erosion and soil quality in the Kan catchment of the Tehran province, central Iran. *Catena*, 204, 105412. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105412.

Emami, H., Astaraei, A.R. & Fotovat, A. (2014). Evaluating the effect of organic matter on soil quality score functions. *Journal of Water and Soil*, 28 (3), 565-574. 20.1001.1.20084757.1393.28.3.12.2. (In Persian).

Friedman, D., Hubbs, M., Tugel, A., Seybold, C. & Sucik, M. (2001). Guidelines for soil quality assessment

in conservation planning. United States Department of Agriculture. *Natural Resources Conservation*.

Hemmati, S., Yaghmaeian, N., Farhangi, M.B. & Sabouri, A. (2023). Soil quality assessment of paddy fields (in Northern Iran) with different productivities: establishing the critical limits of minimum data set indicators. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(4), 10286-10296. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22846-8.

Jiang, M., Xu, L., Chen, X., Zhu, H. & Fan, H. (2020). Soil quality assessment based on a minimum data set: a case study of a county in the typical river delta wetlands. *Sustainability*. 12(21), 9033. https://doi.org/10.3390/su12219033.

Kaiser, H.F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement.* 20(1), 141–151. https://doi.org/10.1177/001316446002000116.

Kemper, W. D. & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis*: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 425-442. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17.

Li, P., Zhang, T., Wang, X. & Yi, D. (2013). Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research*. 126, 112-118. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011.

Li, X., Wang, D., Ren, Y., Wang, Z. & Zhou, Y. (2019). Soil quality assessment of croplands in the black soil zone of Jilin Province, China: Establishing a minimum data set model. *Ecological Indicators.* 107, 105251. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.028.

Liu, Z., Zhou, W., Li, S., He, P., Liang, G., Lv, J., & Jin, H. (2015). Assessing soil quality of gleyed paddy soils with different productivities in subtropical China. *Catena*. 133:293–302. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.029.

Lopes, A.A.C., Sousa, D.M.G., Chaer, G.M., Junior, F.B.R., Goedert, W.J., & Mendes, I.C. (2013). Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 77, 461–472. https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191.

McLean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR (eds) Methods of Soil Analysis, Part 2. *Chemical and Microbiological Properties*, vol 9, 2nd edn. ASA-SSSA, Madison, WI, pp 199–224.

Merrill, S.D., Liebig, M.A., Tanaka, D.L., Krupinsky, J.M. & Hanson, J.D. (2013). Comparison of soil quality and productivity at two sites differing in profile structure and topsoil properties. *Agriculture ecosystems and environment*, 179, 53-61. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.011.

Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R. & Davari, M. (2018). Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*. 318, 16-28. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024.

Nelson, D. A. & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis: Part 3. *Chemical methods*. 5, 961-1010. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34.

Olsen, S.R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.

Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W. & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149 (3–4), 325-334. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015.

Raiesi, F. & Tavakoli, M. (2022). Developing a soil quality index model for assessing landscape-level soil quality along a toposequence in almond orchards using factor analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 4035-4050.

Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological indicators*, 75, 307-320.

Rhoades, J.D. (1982). Soluble salts. In: Page AL (ed) Methods of soil analysis, part II, 2nd ed., ASA, Monograph No. 9, Madison, WI, pp 167–179. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10.

Saleh, A. M., Elsharkawy, M. M., AbdelRahman, M. A. & Arafat, S.M. (2021). Evaluation of soil quality in arid western fringes of the Nile Delta for sustainable agriculture. *Applied and Environmental Soil Science.* 1-17. https://doi.org/10.1155/2021/1434692.

Samaei, F., Emami, H. & Lakzian, A. (2022). Assessing soil quality of pasture and agriculture land uses in Shandiz county, northwestern Iran. *Ecological Indicators*. 139, 108974. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108974.

Sarapatka, B., Cap, L. & Bila, P. (2018). The varying effect of water erosion on chemical and biochemical soil properties in different parts of Chernozem slopes. *Geoderma*. 314:20–26. https:// doi. org/ 10. 1016/j. geode rma. 2017. 10. 037.

Seyed mohammadi, J., Matinfar, H.R., & Esmaeel nejad. L. (2018). Multivariate statistical technique for variability analysis of physical and chemical properties along a paddy soils toposequence. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 777-791. https://doi.org/10.1007/s40808-018-0450-0.

Sheidai Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J. & Shahbazi, F. (2019). Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 19, 648-658. https://doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4.

Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. *USDA*. SCS. Agric. Washington. D.C.

Tabatabai, M. A. (1994). Soil enzymes. Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties. 5, 775-833. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37. (In Persian).

Takoutsing, B., Weber, J., Aynekulu, E., Martín, J. A. R., Shepherd, K., Sila, A., & Diby, L. (2016). Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon. *Geoderma*, 276, 64-73. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.027.

Tian, K., Zhang, B., Zhang, H., Huang, B., Darilek, J.L., Zhao, Y. & Yang. J. (2020). Evaluation of soil quality in major grain-producing region of the North China Plain: integrating minimum data set and established critical limits. *Ecological Indicators*. 117, 106613. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106613.

USDA. (2012). Java Newhall (Soil Climate) Simulation Model (jNSM). *United State Department of Agriculture*, Natural Resources Conservation Service.

Vance, E. D., Brookes, P. C. & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*. 19(6), 703-707. https://doi.org/10.1016/0038-0717 (87)90052-6.

Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.

Wang, C., Zhang, Z., Zhang, J., Tao, F., Chen, Y. & Ding, H. (2019). The effect of terrain factors on rice production: A case study in Hunan Province. *Journal of Geographical Sciences*. 29, 287-305. https://doi.org/10.1007/s11442-019-1597-y.

Wickings, K., Grandy, A.S. &.Kravchenko, A.N. (2016). Going with the flow: landscape position drives differences in microbial biomass and activity in conventional, low input, and organic agricultural systems in the Midwestern U.S. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 218:1–10. https:// doi. org/ 10. 1016/j. agee. 2015. 11. 005.