

## Physical Soil Quality Evaluation of a Part of Beheshtabad Sub-basin in Chaharmahal va Bakhtiari Province

Mehdi Naderi Khorasgani<sup>\*</sup> , Razieh Amiri, Ahmad Karimi and Jahanghard Mohammadi<sup>1</sup>

(Received: October 29-2024 ; Revised: December 29-2024 ; Accepted: February 16-2025)

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

\*: Corresponding author Email: [khnaderi@yahoo.com](mailto:khnaderi@yahoo.com)

### Abstract

The soils of the Shahrekord plain, part of the Beheshtabad watershed subbasin in Shahrekord County, Chaharmahal va Bakhtiari province, have been used for crop production and domestic animal feeding for centuries, yet the soil quality of this plain has been overlooked. Therefore, assessing the quality of Shahrekord plain soil is essential. This research aimed to evaluate the physical soil quality of the plain using soil quality indices such as the Integrated Quality Index (IQI) and Nemoro Quality Index (NQI). A randomized compound sampling strategy was employed, and 106 surficial (0-25 cm) soil samples were collected during intensive fieldwork. Following pretreatments of the soil samples, several key soil characteristics were measured using standard methods, which were compiled into a Total Data Set (TDS) and used to calculate IQITDS and NQITDS. The minimum effective data set (MDS) was selected, and weights for the quality indices were determined using TDS and Principal Component Analysis (PCA). The minimum data set included the soil sand percentage, soil organic matter percentage, mean weighted diameter of aggregates, soil moisture at field capacity, bulk density, soil reaction, and electrical conductivity. The soil quality at each sample site was assessed using the indices and data sets, TDS and MDS. Geostatistical techniques and ordinary kriging methods were utilized to map soil quality. Results indicated that the soil quality of rangelands was significantly higher than that of cultivated soils (irrigated and drylands). Additionally, approximately 71% of the soils were classified as very low, low, and medium quality, highlighting the need for monitoring and managing such soils.

**Keywords:** Physical quality of soil, Integrated soil quality index, Nemoro soil quality index, Shahrekord plain

**How to cite this article:** Naderi Khorasgani, M., Amiri, R., Karimi, A. and Mohammadi, J. 2025. Physical Soil Quality Evaluation of a Part of Beheshtabad Sub-basin in Chaharmahal va Bakhtiari Province. *J. Water and Soil Sci.* 29(1):153-164. DOI: [10.47176/jwss.29.1.32202](https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.32202)

Copyright © 2025 Naderi Khorasgani et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

## ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک بخشی از زیرحوضه بهشت آباد در استان چهارمحال و بختیاری

مهدی نادری خوراسگانی<sup>ID\*</sup>، راضیه امیری، احمد کریمی و جهانگرد محمدی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸)

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: [khnaderi@yahoo.com](mailto:khnaderi@yahoo.com)

### چکیده

خاک‌های دشت شهرکرد، بخشی از زیرحوضه بهشت آباد در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری قرن‌ها برای تولید محصولات کشاورزی و تغذیه دام‌ها استفاده شده‌اند، درحالی‌که کیفیت خاک‌های این دشت نادیده گرفته شده است؛ بنابراین ضروری است که کیفیت این خاک‌ها که تحت سامانه‌های مختلفی مدیریت می‌شوند، بررسی شود. این پژوهش با هدف محاسبه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک شامل شاخص جامع کیفیت (Integrated Quality Index, IQI) و شاخص کیفیت نمورو (Nemoro Quality Index, NQI) در کاربری‌های مختلف منطقه مطالعاتی انجام شد. برای رسیدن به این اهداف طی عملیات فشرده میدانی، ۱۰۶ نمونه مرکب تصادفی سطحی (۰-۲۵ cm) از کاربری‌های مختلف جمع‌آوری شد. پس از تیمارهای اولیه برخی ویژگی‌های بارز خاک به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و به‌عنوان دسته کل داده‌ها (Total Data Set, TDS) در نظر گرفته شدند و برای محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک  $IQI_{TDS}$  و  $NQI_{TDS}$  استفاده شدند. با استفاده از مجموعه کل داده‌ها و تجزیه داده‌ها به مؤلفه‌های اصلی کمترین دسته‌داده (Minimum Data Set, MDS) قابل استفاده برای محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک  $IQI_{MDS}$  و  $NQI_{MDS}$  و وزن‌های مربوطه تعیین شدند. کمترین دسته‌داده‌ها عبارت بودند از: درصد شن، درصد مواد آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، رطوبت ظرفیت زراعی، چگالی ظاهری، واکنش خاک و هدایت الکتریکی خاک. کیفیت فیزیکی خاک هر نقطه نمونه‌برداری با استفاده از هر دو شاخص و دو گروه داده‌ها تعیین شد. زمین‌آمار و کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک استفاده شدند. نتایج نشان دادند که شاخص‌های کیفیت خاک مراتع با تفاوت معنی‌داری بیشتر از خاک‌های زراعی (آبی و دیم) هستند. همچنین کاربرد چهار شاخص کیفیت خاک نشان داد که حدود ۷۱ درصد از مساحت خاک‌های منطقه مورد مطالعه در کلاس‌های بسیار کم، کم و متوسط کیفیت قرار دارند و رصد مدیریت این خاک‌ها ضرورت دارد.

واژه‌های کلیدی: کیفیت فیزیکی خاک، شاخص یکپارچه کیفیت خاک، شاخص کیفیت خاک نمورو، دشت شهرکرد

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



## مقدمه

یکی از جامع‌ترین تعاریف کیفیت خاک عبارت است از توانایی خاک در انجام وظایف خود به‌عنوان یک سیستم زنده در داخل اکوسیستم با کاربری‌های مختلف به‌طوری که علاوه بر حفظ تولید بیولوژیک، بتواند کیفیت آب‌وهوا را بهبود بخشد و تأمین‌کننده سلامت انسان، گیاه و حیوان باشد (۱۱). برای ارزیابی کیفیت خاک از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که بر اساس ویژگی‌های خاک تعریف شده‌اند و این ویژگی‌ها به تغییر کاربری و شیوه‌های مدیریت خاک حساس‌اند (۳).

کیفیت خاک شامل کیفیت ذاتی و کیفیت پویای خاک است و سلامت خاک تابع کیفیت پویای خاک است (۱). کیفیت خاک نمایانگر مقاومت خاک به تنش‌های محیطی و انتقال آب‌وهوا در ناحیه ریشه نیز است (۲۳). مهم‌ترین ویژگی‌های کیفیت فیزیکی خاک عبارت‌اند از: گنجایش نسبی رطوبت مزرعه، گنجایش تهویه‌ای، چگالی ظاهری، شاخص پایداری ساختمان خاک (۲۳)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (۸) و شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف به‌دلیل همبستگی زیاد آن با رطوبت مطلوب زمان شخم، مقاومت خاک در مقابل ریشه و آب قابل استفاده (۱۰) و علاوه بر آنها کاستلینی (۶). تغییر کاربری و خاک‌ورزی مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت فیزیکی خاک‌اند (۱۶، ۲۵ و ۲۸).

روش‌های متنوع ارزیابی کیفیت خاک شامل استفاده از کارت‌های کیفیت خاک (Soil Quality Cards)، (۱۰)، تعیین شاخص‌های کیفیت خاک (Soil Quality Indexing) (۱۲) و راهکار کریجینگ چند متغیره (Multivariate Kriging Approach) (۹) هستند. ارزیابی کیفیت خاک را می‌توان بر اساس کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (Total Data Set, TDS)، انجام داد (۴) و یا با کاهش هزینه‌ها به کمک مجموعه‌ای حداقلی از ویژگی‌های خاک (Minimum Data Set, MDS) تعیین کرد (۱۵ و ۳۰).

شاخص جامع کیفیت خاک (Integrated Quality Index, IQI) توسط دوران و پارکین (۱۱) ارائه شد. شاخص معمول دیگر برای اندازه‌گیری کیفیت خاک، شاخص کیفیت نمورو (Nemoro Quality Index, NQI) است که بر اساس میانگین

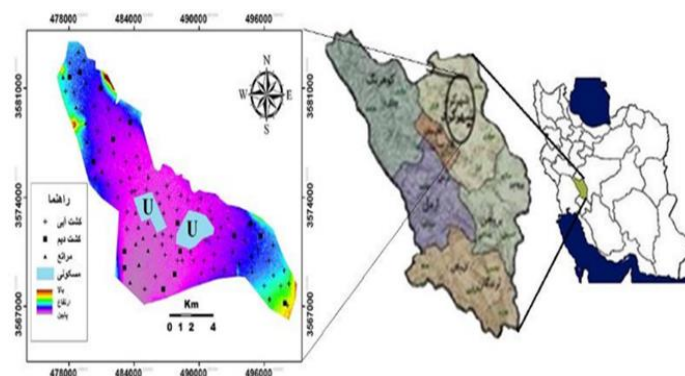
امتیاز حاصل از توابع امتیازدهی ویژگی‌های خاک و حداقل امتیاز ویژگی‌ها در هر نقطه نمونه‌برداری کیفیت خاک را مشخص می‌کند. در ایران فلاح‌زاده و حاج‌عباسی (۱۳)، شهاب‌آرخازلو و همکاران (۲۴) و رحمانی‌پور و همکاران (۲۲) کیفیت خاک را در مناطق مختلف بررسی و گزارش کردند.

لازم است خاک‌های دشت شهرکرد، زیرحوضه آبخیز رودخانه بهشت‌آباد که طی سال‌های متمادی زیرکشت محصولات آبی بوده‌اند یا به‌دلیل محدودیت‌های محیطی به کشت دیم و یا مرتع اختصاص یافته‌اند، از نظر کیفیت فیزیکی خاک ارزیابی شوند. با توجه به گستردگی عملیات و هزینه‌های زیاد ارزیابی شیمیایی و بیولوژیکی خاک، این مطالعه محدود به ارزیابی فیزیکی خاک‌های آن زیرحوضه است. اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱) تعیین کیفیت فیزیکی خاک‌های منطقه به کمک شاخص کیفیت جامع خاک و شاخص کیفیت خاک نمورو، ۲) تعیین حداقل ویژگی‌های فیزیکی خاک برای تعیین شاخص‌های کیفیت جامع خاک و شاخص کیفیت خاک نمورو، ۳) پهنه‌بندی شاخص کیفیت جامع خاک و شاخص کیفیت خاک نمورو.

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در دشت شهرکرد زیرحوضه آبخیز بهشت‌آباد به مساحت تقریبی ۱۳۰۰۰ هکتار واقع در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری انجام شد (شکل ۱). محدوده منطقه دارای طول جغرافیایی  $50^{\circ} 38'$  تا  $51^{\circ} 38'$  و عرض جغرافیایی  $33^{\circ} 53'$  تا  $34^{\circ} 07'$  است و ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۲۰۶۰ متر است. واحدهای فیزیوگرافی بیشتر منطقه، دشت‌های آبرفتی و دامنه‌ای است. کاربری عمده اراضی کشت‌های آبی گندم، جو، یونجه، اسپرس، آیش و گندم دیم است و مراتع نیز بر روی دشت‌های دامنه‌ای قرار دارند (شکل ۱). میانگین سالانه درجه حرارت و بارش منطقه به ترتیب ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۲۰ میلی‌متر و تعداد روزهای یخبندان ۱۴۷ روز در سال است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک و رژیم حرارتی و رطوبتی خاک به ترتیب مزیک و زریک است (۲).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه در استان چهارمحال و بختیاری، کشور و مکان ۱۰۶ نقطه نمونه برداری روی مدل ارتفاع رقومی منطقه

### نمونه برداری خاک

رطوبت در مکش های ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال و با استفاده از دستگاه صفحه فشاری (Pressure Plate) و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (۱۷) اندازه گیری شدند. با توجه به تأثیر کربن آلی، واکنش و هدایت الکتریکی خاک بر کیفیت فیزیکی خاک ها، کربن آلی به روش سوزاندن تر (۲۷)، واکنش خاک در گل اشباع به وسیله pH متر و هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity) عصاره گل اشباع به وسیله EC متر اندازه گیری شدند (۲۶).

### شاخص های ارزیابی کیفیت خاک

#### شاخص های تعیین کیفیت فیزیکی خاک

شاخص جامع کیفیت خاک شاخصی است که در آن با توجه به اهمیت هر ویژگی به آن وزن داده می شود و میزان شاخص کیفیت هر خاک با جمع حاصل ضرب امتیاز ویژگی ها در وزن اختصاص یافته به آن ها مشخص می شود (معادله ۱):

$$IQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot N_i \quad (1)$$

در این معادله  $IQI$ ،  $N_i$  و  $W_i$  به ترتیب عبارت اند از: شاخص کیفیت جامع، امتیاز و وزن ویژگی خاک. وزن هر ویژگی از محاسبه واریانس مشترک ( $Communality$ ) ویژگی ها حاصل می شود؛ بدین صورت که طی تجزیه به مؤلفه های اصلی، واریانس مشترک متغیرها استخراج و از محاسبه نسبت واریانس مشترک هر متغیر به مجموع واریانس مشترک کل ویژگی ها وزن هر متغیر محاسبه شد. واریانس مشترک زیاد یک ویژگی بدین مفهوم است که آن ویژگی نسبت بیشتری از واریانس را توضیح می دهد.

مکان ۱۰۶ نقطه به صورت تصادفی به کمک نرم افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی Idrisi V.20 روی مدل رقومی ارتفاع منطقه تعیین شدند (شکل ۱)؛ به طوری که ۷۲ نمونه در کاربری کشت آبی، ۱۸ نمونه در مناطق زیرکشت دیم و ۱۶ نمونه در مراتع قرار گرفتند. مختصات مکان نمونه ها برای بازیابی میدانی به یک دستگاه سامانه موقعیت جهانی (GPS) وارد شدند. الگوی نمونه برداری تصادفی مرکب از خاک سطحی (۰-۲۵ cm) بود؛ به طوری که نقطه تعیین شده در سامانه موقعیت جهانی مرکز یک مربع به ابعاد ۳۰ متر در نظر گرفته شد و ۵ نمونه از چهار گوشه و مرکز مربع به مقدار مساوی برداشته شد و در محل مخلوط شدند. سپس نمونه ها در آزمایشگاه خشک و از الک ۴ و ۲ میلی متری عبور داده شدند. از مرکز هر مربع یک نمونه دست نخورده برای اندازه گیری چگالی ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع برداشته شد.

### تجزیه آزمایشگاهی

بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۴)، میانگین وزنی قطر خاکدانه های پایدار در آب ( $MWD_{wet}$ ) به روش الکتر (۲۹) و الک خشک ( $MWD_{dry}$ )، میانگین هندسی قطر خاکدانه ها نیز به هر دو روش تر ( $GMD_{wet}$ ) و خشک ( $GMD_{dry}$ ) تعیین شدند (۷). چگالی ظاهری به روش سیلندر (۱۸)، تخلخل خاک با استفاده از نسبت چگالی ظاهری به حقیقی خاک (با فرض چگالی حقیقی  $2.65 \text{ g.cm}^{-3}$ )، آب قابل دسترس از تفاوت میزان

## تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

## تجزیه به سه مؤلفه‌های اصلی

## (Principle Component Analysis, PCA)

با توجه به اینکه استفاده از کل داده‌ها (TDS) برای بررسی تغییرات کیفیت خاک مستلزم هزینه است، برای کاهش هزینه‌های آتی و سرعت بخشیدن به بررسی‌ها از طریق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی کمترین داده‌های مورد نیاز (Minimum Data Set, MDS) مشخص شدند. در این راستا ماتریس همبستگی ویژگی‌های خاک تهیه شد و بردار ویژه (Eigen Vector) و مقدار ویژه (Eigen Value) مؤلفه‌ها محاسبه شدند. مؤلفه‌هایی که مقادیر ویژه آن‌ها یک و بیش از یک باشد ( $\text{eigen value} \geq 1$ )، برای تعیین MDS انتخاب شدند (۱ و ۱۵). پس از انتخاب مؤلفه‌های مد نظر، در هر مؤلفه ویژگی‌هایی که دارای بیشترین وزن برداری بودند، تعیین شدند و در مرحله بعد ویژگی‌هایی که وزن برداری آن‌ها بیش از ۹۰ درصد بردارهای انتخاب شده بود، به عنوان ویژگی‌های تأثیرگذار برگزیده شدند. در صورت همبستگی معنی‌دار بین ویژگی‌های انتخاب شده، ویژگی با وزن بیشتر ترجیح داده شد. برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه عاملی (Factor Analysis) از نرم‌افزارهای SPSS و Minitab استفاده شد.

## پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک

روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی و میان‌یابی شاخص‌های کیفیت خاک وجود دارد. در این پژوهش از کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) استفاده شد. گرچه نرمال بودن داده‌ها برای انجام درون‌یابی به روش کریجینگ ضرورت ندارد، اما با استفاده از آماره کلموگرونیف - اسمیرنوف تست نرمال بودن داده‌ها به عمل آمد. برای تهیه واریوگرام از نرم‌افزار GeoEas استفاده شد و با سعی و خطای مدل، آستانه، دامنه، اثر قطعه‌ای، تعداد گام‌ها و کمترین و بیشترین نقاط بهینه شدند و میزان خطا به کمترین و میزان همبستگی مکانی به بیشترین مقدار رسانده شد. پهنه‌بندی شاخص‌ها به وسیله نرم‌افزار ArcGIS 10.3 انجام شد.

شاخص کیفیت خاک نمورو دیگری شاخصی است که استفاده شد (معادله ۲):

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \sqrt{\frac{n-1}{n}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، NQI شاخص کیفیت نمورو،  $P_{ave}$  میانگین امتیاز ویژگی‌ها (حاصل از توابع استاندارد فازی) در هر نقطه،  $P_{min}$  حداقل امتیاز ویژگی‌های مورد بررسی در هر نقطه و  $n$  تعداد ویژگی‌ها است.

به دلیل متنوع بودن ویژگی‌ها و واحدهای آن‌ها برای تعیین امتیاز ویژگی‌ها از توابع امتیازدهی استاندارد استفاده شد (۱۹). برای تعیین امتیاز ویژگی‌های توابع به سه گروه تقسیم شدند: (۱) گروه "بیشتر بهتر" (More is better)، (۲) گروه "کمتر بهتر" (Less is better)، (۳) گروه "دامنه بهینه" (Optimal range). با در نظر گرفتن گروه هر ویژگی برای هر یک از ویژگی‌ها توابعی فازی ایجاد و امتیاز هر ویژگی تعیین شد. گروه (۱) شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، مواد آلی، میانگین قطر خاکدانه‌ها، درصد اشباع خاک، نقطه پژمردگی دائم، ظرفیت زراعی، آب قابل استفاده و تخلخل مؤثره ای بودند. برای این گروه بیشترین امتیاز ۱ و کمترین امتیاز ۰/۱ در نظر گرفته شد.

در مورد ویژگی‌هایی مثل تخلخل کل، درصد شن، درصد رس و هدایت الکتریکی به دامنه مطلوب این ویژگی‌ها امتیاز ۱ و دیگر مقادیر (اعم از کاهش یا افزایش) بر اساس تابع ارائه شده امتیاز داده شد. در مورد واکنش خاک (pH) مقدار بهینه آن ۷ تعیین شد (۱۹). در نمونه‌های خاک منطقه مقدار واکنش خاک از ۷ بیشتر بود؛ بنابراین امتیاز "کمتر بهتر" استفاده شد و عدد ۷ مقدار مطلوب با امتیاز ۱ تعیین شد. به بیشترین مقدار pH موجود در منطقه امتیاز ۰/۱ داده شد. برای هدایت الکتریکی خاک دامنه بهینه ۲-۰/۲ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد (۱ و ۱۹) و برای مقادیر کمتر از ۰/۲ دسی‌زیمنس بر متر از تابع "بیشتر بهتر" و برای نمونه‌های بیشتر از ۲ از تابع "کمتر بهتر" استفاده شد. در مورد چگالی ظاهری و درصد سیلت خاک با توجه به اثر منفی مقادیر زیاد آن‌ها بر کیفیت خاک در گروه "کمتر بهتر" قرار گرفتند. حداقل و حداکثر امتیاز برای این گروه ۱ و ۰/۱ در نظر گرفته شد.

## ارزیابی پهنه‌بندی‌ها

برای ارزیابی پهنه‌بندی‌ها از اعتبارسنجی متقاطع (Cross Validation) انجام شد و با استفاده از داده‌های حاصل میانگین خطای اریب (Mean Bias Error, MBE) طبق معادله (۳) محاسبه شد.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - M_i}{n} \quad (3)$$

در معادله (۳)،  $E_i$  مقدار تخمین،  $M_i$  مقدار اندازه‌گیری‌شده در همان نقطه و  $n$  تعداد نقاط مورد محاسبه هستند.

روش دیگر ارزیابی پهنه‌بندی محاسبه ریشه دوم میانگین مجذور خطا (Root Mean Square Error, RMSE) بود (معادله ۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^* - Z_i)^2}{n}} \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $Z_i^*$  مقدار تخمین و  $Z_i$  مقدار اندازه‌گیری‌شده شاخص و  $n$  تعداد نمونه‌ها هستند.

## نتایج و بحث

## آمار توصیفی ویژگی‌های خاک

جدول ۱ نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر هدایت الکتریکی بین سه کاربری معنی‌دار بودند. کمترین مقدار چگالی ظاهری مربوط به مراتع و پس از آن به کاربری زراعت دیم تعلق دارد. اراضی با کاربری مرتع بیشترین میانگین تخلخل را نشان دادند. همچنین خاک‌ها با کاربری مرتع بیشترین میانگین رطوبت را در شرایط اشباع داشتند؛ ولی اختلاف میانگین سه کاربری از نظر این ویژگی معنی‌دار نبود. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) تر و خشک در سه کاربری اختلاف معنی‌داری را نشان ندادند. سه کاربری مورد بررسی از نظر میانگین آب قابل استفاده اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند؛ ولی خاک‌ها با کاربری مرتع بیشترین میانگین رطوبت در شرایط پژمردگی را داشتند. بیشترین ضریب تغییرات در خاک‌ها با کاربری کشاورزی به ترتیب مربوط به ویژگی‌های آب قابل دسترس (۵۷٪) بود.

## تجزیه داده‌ها به مؤلفه‌های اصلی و انتخاب گروه کمترین داده‌ها

برای گزینش گروه کمترین داده‌ها (MDS) بر اساس توصیه پژوهشگران (۱ و ۱۵)، تجزیه داده‌ها به مؤلفه‌های اصلی انجام شد. از ۱۸ مؤلفه محاسبه‌شده، ۶ مؤلفه مؤثر با ارزش ویژه بیش از ۱ که ۷۵ درصد کل ارزش ویژه مؤلفه‌ها را تشکیل می‌دهند، برگزیده شدند (جدول ۲). اولین مؤلفه دارای ارزش ویژه ۴/۴۶ و ششمین مؤلفه ارزش ویژه ۱/۰۵ را دارا بود. در داخل هریک از ۶ مؤلفه انتخاب‌شده، ویژگی‌ها با بیشترین ارزش برداری و ویژگی‌ها با ارزش برداری ۹۰ درصد و بیشتر ویژگی با بیشترین ارزش برداری به‌عنوان دسته حداقل داده‌ها (MDS) انتخاب شدند. درصد شن، سیلت و مواد آلی از مؤلفه اول، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) در شرایط خشک از مؤلفه دوم، رطوبت در ظرفیت زراعی و آب قابل دسترس از مؤلفه سوم، چگالی ظاهری و تخلخل خاک از مؤلفه چهارم، واکنش خاک از مؤلفه پنجم و هدایت الکتریکی خاک از مؤلفه ششم بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند و به‌عنوان MDS انتخاب شدند. آزمون همبستگی پیرسون بین ۱۱ ویژگی انتخاب‌شده نشان داد که سه ویژگی درصد شن، سیلت و مواد آلی در مؤلفه اول همبستگی معنی‌داری با هم دارند؛ به همین دلیل درصد شن و مواد آلی به‌دلیل اهمیت آن (۳) در دسته حداقل داده‌ها حفظ شدند و درصد سیلت حذف شد. به همین ترتیب از مؤلفه دوم MWD و GMD همبستگی قوی و معنی‌داری ( $r=0.97$ ) با هم داشتند و MWD انتخاب شد و از مؤلفه‌های سوم و چهارم نیز رطوبت ظرفیت مزرعه و چگالی ظاهری خاک انتخاب شدند. بدین ترتیب از ۱۸ ویژگی مورد بررسی ۷ ویژگی شامل درصد شن، درصد مواد آلی، MWD خشک، چگالی ظاهری، واکنش خاک و هدایت الکتریکی خاک به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

جدول ۱. خلاصه آماری و مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک به روش T-test مستقل در کاربری‌ها

| متغیر                                             | آبی           |        |       |       |               |               | دیم    |       |       |                |         |        | مرتع  |       |                |               |        |       |       |       |
|---------------------------------------------------|---------------|--------|-------|-------|---------------|---------------|--------|-------|-------|----------------|---------|--------|-------|-------|----------------|---------------|--------|-------|-------|-------|
|                                                   | میانگین       | پیشینه | کمینه | CV    | SE            | میانگین       | پیشینه | کمینه | CV    | SE             | میانگین | پیشینه | کمینه | CV    | SE             | میانگین       | پیشینه | کمینه | CV    |       |
| هدایت هیدرولیکی (cm/h)                            | ۰/۸۴ ± ۰/۰۵c  | ۱/۷۹   | ۰/۲۰  | ۴۷/۷۴ | ۱/۱۷ ± ۰/۰۷b  | ۱/۱۷ ± ۰/۰۷b  | ۱/۷۹   | ۰/۵۴  | ۲۴/۴۸ | ۱/۸۶ ± ۰/۰۸a   | ۲/۱۹    | ۱/۰۰   | ۱۳/۳۶ | ۰/۹۳  | ۱/۱۷ ± ۰/۰۴b   | ۷/۱۵          | ۱/۱۷   | ۱/۵۳  | ۱۳/۳۶ |       |
| چگالی ظاهری (mg/cm <sup>3</sup> )                 | ۱/۲۳ ± ۰/۰۲b  | ۱/۵۲   | ۰/۸۸  | ۱۰/۴۶ | ۱/۳۰ ± ۰/۰۲a  | ۱/۳۰ ± ۰/۰۲a  | ۱/۵۳   | ۱/۱۷  | ۷/۱۵  | ۱/۱۷ ± ۰/۰۴b   | ۱/۴۲    | ۰/۹۳   | ۱۰/۹۳ | ۰/۴۶  | ۰/۵۶ ± ۰/۰۲a   | ۷/۱۸          | ۰/۴۲   | ۰/۵۶  | ۱۰/۹۳ |       |
| تخلخل کل                                          | ۰/۵۳ ± ۰/۰۱a  | ۰/۶۷   | ۰/۴۳  | ۹/۱۰  | ۰/۵۱ ± ۰/۰۱b  | ۰/۵۱ ± ۰/۰۱b  | ۰/۵۶   | ۰/۴۲  | ۷/۱۸  | ۰/۴۴ ± ۰/۰۱a   | ۰/۵۳    | ۰/۲۸   | ۱۲/۷۴ | ۰/۳۲  | ۰/۴۵ ± ۰/۰۲a   | ۱۲/۷۱         | ۰/۲۸   | ۰/۵۳  | ۱۲/۷۴ |       |
| تخلخل مؤثر                                        | ۰/۴۴ ± ۰/۰۱a  | ۰/۵۳   | ۰/۳۲  | ۱۲/۷۴ | ۰/۴۴ ± ۰/۰۱a  | ۰/۴۴ ± ۰/۰۱a  | ۰/۵۳   | ۰/۲۸  | ۱۲/۷۴ | ۰/۴۴ ± ۰/۰۱a   | ۰/۵۳    | ۰/۲۸   | ۱۲/۷۴ | ۰/۳۲  | ۰/۴۵ ± ۰/۰۲a   | ۱۲/۷۱         | ۰/۲۸   | ۰/۵۳  | ۱۲/۷۴ |       |
| شش (°)                                            | ۴۵/۶۸ ± ۱/۱۹b | ۷۶/۶۸  | ۲۸/۶۸ | ۲۲/۰۷ | ۲۲/۰۷ ± ۲/۰۰b | ۲۲/۰۷ ± ۲/۰۰b | ۷۸/۶۴  | ۲۲/۶۸ | ۲۸/۸۳ | ۵۵/۱۸ ± ۲/۲۶a  | ۷۲/۶۸   | ۴۲/۶۸  | ۱۶/۴۰ | ۴۲/۶۸ | ۵۵/۱۸ ± ۲/۲۶a  | ۲۸/۸۳         | ۲۲/۶۸  | ۲۸/۸۳ | ۱۶/۴۰ |       |
| سیلت (°)                                          | ۴۱/۶۱ ± ۱/۰۲a | ۶۴/۰۰  | ۱۶/۰۰ | ۲۰/۸۱ | ۴۳/۰۰ ± ۲/۸۱a | ۴۳/۰۰ ± ۲/۸۱a | ۶۸/۰۰  | ۱۸/۰۰ | ۲۷/۶۹ | ۳۳/۸۸ ± ۱/۸۸b  | ۴۶/۰۰   | ۲۰/۰۰  | ۲۲/۲۴ | ۴۶/۰۰ | ۳۳/۸۸ ± ۱/۸۸b  | ۲۷/۶۹         | ۲۰/۰۰  | ۲۲/۲۴ | ۲۲/۲۴ |       |
| رس (°)                                            | ۱۲/۷۱ ± ۰/۰۳a | ۲۱/۳۲  | ۵/۳۲  | ۲۸/۶۵ | ۲۸/۶۵ ± ۰/۸۵a | ۲۸/۶۵ ± ۰/۸۵a | ۱۹/۳۲  | ۷/۳۲  | ۲۷/۹۷ | ۱۰/۹۵ ± ۰/۰۹۰a | ۱۷/۳۲   | ۲/۳۲   | ۲۲/۲۴ | ۲/۳۲  | ۱۰/۹۵ ± ۰/۰۹۰a | ۲۷/۹۷         | ۷/۳۲   | ۲/۳۲  | ۲۲/۲۴ |       |
| ماده آلی (°)                                      | ۱/۷۷ ± ۰/۰۹b  | ۴/۰۳   | ۰/۳۵  | ۴۲/۳۷ | ۱/۶۸ ± ۰/۱۵b  | ۱/۶۸ ± ۰/۱۵b  | ۲/۹۷   | ۰/۵۴  | ۳۸/۴۳ | ۳/۵۹ ± ۰/۰۴۸a  | ۵/۲۷    | ۰/۵۱   | ۵۳/۹۵ | ۰/۵۱  | ۵/۲۷           | ۳/۵۹ ± ۰/۰۴۸a | ۳۸/۴۳  | ۰/۵۴  | ۰/۵۱  | ۵۳/۹۵ |
| MWD خشک (mm)                                      | ۱/۲۰ ± ۰/۰۳b  | ۱/۹۷   | ۰/۶۳  | ۲۴/۱۴ | ۱/۲۱ ± ۰/۰۷b  | ۱/۲۱ ± ۰/۰۷b  | ۱/۷۴   | ۰/۸۷  | ۲۴/۱۵ | ۱/۳۸ ± ۰/۰۷a   | ۱/۸۱    | ۰/۸۳   | ۱۹/۳۴ | ۰/۸۳  | ۱/۳۸ ± ۰/۰۷a   | ۲۴/۱۵         | ۰/۸۷   | ۰/۸۳  | ۱۹/۳۴ |       |
| MWD مرطوب (mm)                                    | ۱/۰۴ ± ۰/۰۰۴b | ۱/۱۳   | ۰/۹۸  | ۳/۵۴  | ۱/۰۴ ± ۰/۰۱b  | ۱/۰۴ ± ۰/۰۱b  | ۱/۱۰   | ۱/۰۰  | ۳/۴۱  | ۱/۰۸ ± ۰/۰۱a   | ۱/۱۶    | ۱/۰۱   | ۴/۲۶  | ۱/۰۱  | ۱/۰۸ ± ۰/۰۱a   | ۳/۴۱          | ۱/۰۰   | ۱/۰۱  | ۴/۲۶  |       |
| GMD خشک (mm)                                      | ۱/۱۲ ± ۰/۰۰۷a | ۱/۲۹   | ۱/۰۲  | ۴۹/۸۷ | ۱/۱۲ ± ۰/۰۱a  | ۱/۱۲ ± ۰/۰۱a  | ۱/۷۴   | ۰/۸۷  | ۲۴/۱۵ | ۱/۱۵ ± ۰/۰۱a   | ۱/۲۵    | ۱/۰۴   | ۴/۹۵  | ۱/۰۴  | ۱/۱۵ ± ۰/۰۱a   | ۲۴/۱۵         | ۰/۸۷   | ۱/۰۴  | ۴/۹۵  |       |
| GMD مرطوب (mm)                                    | ۰/۵۶ ± ۰/۰۳b  | ۱/۲۰   | ۰/۰۹  | ۴۹/۸۷ | ۰/۵۸ ± ۰/۰۶b  | ۰/۵۸ ± ۰/۰۶b  | ۱/۰۱   | ۰/۲۵  | ۴۲/۰۶ | ۰/۸۶ ± ۰/۰۶a   | ۱/۳۱    | ۰/۴۷   | ۳۰/۱۸ | ۰/۴۷  | ۰/۸۶ ± ۰/۰۶a   | ۴۲/۰۶         | ۰/۲۵   | ۰/۴۷  | ۳۰/۱۸ |       |
| pH                                                | ۷/۸۴ ± ۰/۰۵a  | ۸/۶۴   | ۷/۰۱  | ۴/۹۶  | ۷/۹۶ ± ۰/۰۱a  | ۷/۹۶ ± ۰/۰۱a  | ۸/۵۳   | ۷/۳۸  | ۵/۲۶  | ۷/۸۸ ± ۰/۰۸a   | ۸/۴۶    | ۷/۵۵   | ۳/۹۱  | ۷/۵۵  | ۷/۸۸ ± ۰/۰۸a   | ۵/۲۶          | ۷/۳۸   | ۷/۵۵  | ۳/۹۱  |       |
| هدایت الکتریکی (dSm <sup>-1</sup> )               | ۵/۶۱ ± ۱/۰۵b  | ۷۲/۹۲  | ۳۳/۳۳ | ۱۶/۳۷ | ۵/۲۴ ± ۰/۰۲b  | ۵/۲۴ ± ۰/۰۲b  | ۸/۹۱   | ۵/۱۶  | ۱۵/۴۹ | ۷۱/۶۱ ± ۳/۶۴a  | ۹۴/۴۳   | ۴۳/۵۱  | ۲۰/۳۱ | ۴۳/۵۱ | ۷۱/۶۱ ± ۳/۶۴a  | ۱۵/۴۹         | ۵/۱۶   | ۴۳/۵۱ | ۲۰/۳۱ |       |
| درصد اشباع (SP%)                                  | ۶/۷۹ ± ۰/۱۶b  | ۹/۸۵   | ۳/۹۷  | ۲۰/۵۳ | ۶/۹۸ ± ۰/۰۵b  | ۶/۹۸ ± ۰/۰۵b  | ۸/۹۱   | ۵/۱۶  | ۱۵/۴۹ | ۸/۱۵ ± ۰/۰۴a   | ۹۴/۴۳   | ۴۳/۵۱  | ۲۱/۵۵ | ۴۳/۵۱ | ۸/۱۵ ± ۰/۰۴a   | ۱۵/۴۹         | ۵/۱۶   | ۴۳/۵۱ | ۲۱/۵۵ |       |
| PWP (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )           | ۱۷/۳۵ ± ۰/۷۱a | ۳۷/۲۷  | ۱۰/۲۷ | ۳۴/۵۷ | ۱۶/۸۲ ± ۱/۰۶a | ۱۶/۸۲ ± ۱/۰۶a | ۲۹/۸۱  | ۱۲/۸۶ | ۲۶/۶۹ | ۱۷/۷۷ ± ۰/۶۸a  | ۲۱/۸۸   | ۱۲/۸۲  | ۱۵/۳۵ | ۱۵/۳۵ | ۱۷/۷۷ ± ۰/۶۸a  | ۲۶/۶۹         | ۱۲/۸۶  | ۱۵/۳۵ | ۲۱/۸۲ |       |
| FC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )            | ۱۰/۵۶ ± ۰/۷۱a | ۲۹/۶۶  | ۴/۱۷  | ۵۷/۰۶ | ۹/۸۴ ± ۱/۰۰a  | ۹/۸۴ ± ۱/۰۰a  | ۲۱/۵۱  | ۵/۹۴  | ۲۳/۰۲ | ۹/۶۲ ± ۰/۰۴۰a  | ۱۲/۹۳   | ۶/۷۰   | ۱۶/۸۳ | ۱۶/۸۳ | ۹/۶۲ ± ۰/۰۴۰a  | ۲۳/۰۲         | ۵/۹۴   | ۱۲/۹۳ | ۱۶/۸۳ |       |
| آب قابل دسترس (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) |               |        |       |       |               |               |        |       |       |                |         |        |       |       |                |               |        |       |       |       |

جدول ۲. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای انتخاب کمترین داده‌ها

| مؤلفه‌های اصلی                    | PC1    | PC2    | PC3    | PC4    | PC5    | PC6    |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ارزش ویژه                         | ۴/۴۶   | ۲/۶۱   | ۲/۰۹   | ۱/۸۵   | ۱/۴۳   | ۱/۰۴   |
| درصد واریانس                      | ۲۴/۸   | ۱۴/۵   | ۱۱/۷   | ۱۰/۳   | ۸      | ۵/۸    |
| درصد واریانس تجمعی                | ۲۴/۸   | ۳۹/۳   | ۵۱     | ۶۱/۲   | ۶۹/۲   | ۷۵     |
| KS (cm/h)                         | ۰/۲۴۶  | ۰/۰۷   | -۰/۱۱۶ | -۰/۱۹۱ | -۰/۳۲۶ | -۰/۰۹۵ |
| چگالی ظاهری (mg/cm <sup>3</sup> ) | -۰/۲۹  | -۰/۱۲۶ | -۰/۰۴۸ | -۰/۴۹۷ | -۰/۰۰۱ | ۰/۱۵۹  |
| تخلخل کل                          | ۰/۲۸۹  | ۰/۱۳   | ۰/۰۴۳  | ۰/۴۹۷  | ۰/۰۰۷  | -۰/۱۶۱ |
| تخلخل موئینه‌ای                   | ۰/۱۷۷  | ۰/۰۵۱  | ۰/۰۱۴  | ۰/۳۱   | ۰/۲۸۷  | ۰/۲۹۳  |
| شن (%)                            | ۰/۳۷۶  | ۰/۱۴۲  | ۰/۰۹۵  | -۰/۱۶۸ | ۰/۲۰۹  | ۰/۰۴۷  |
| سیلت (%)                          | -۰/۳۴۶ | -۰/۱۱۴ | -۰/۰۷۱ | ۰/۱۸۴  | -۰/۱۶  | -۰/۱۹۹ |
| رس (%)                            | -۰/۲۲۴ | -۰/۱۲۸ | -۰/۰۹۸ | ۰/۰۲۴  | -۰/۲۱  | ۰/۳۷۷  |
| ماده آلی (%)                      | ۰/۳۶۶  | ۰/۱۲۲  | -۰/۱۲۲ | ۰/۰۹۴  | -۰/۰۶۳ | ۰/۱۰۳  |
| MWD خشک                           | ۰/۱۲۱  | -۰/۴۸۷ | -۰/۱۹۴ | ۰/۲۰۱  | -۰/۱۵۷ | ۰/۱۲۴  |
| MWD مرطوب                         | ۰/۲۱۸  | -۰/۴۲۶ | ۰/۰۴۱  | -۰/۱۷۳ | ۰/۲۱۷  | -۰/۱۷۳ |
| GMD خشک                           | ۰/۱۲   | -۰/۴۸۷ | -۰/۱۸۹ | ۰/۲۲۷  | -۰/۱۶۳ | ۰/۱۳۲  |
| GMD مرطوب                         | ۰/۲۳۵  | -۰/۴۱۴ | ۰/۰۱۳  | -۰/۱۷۳ | ۰/۱۷۷  | -۰/۱۶۹ |
| pH                                | ۰/۰۵۸  | ۰/۰۲۳  | -۰/۰۳۳ | -۰/۱۷۳ | -۰/۴۹۱ | ۰/۱۸۷  |
| هدایت الکتریکی                    | ۰/۰۴۲  | ۰/۱۲۲  | -۰/۱۸۷ | ۰/۲۱۳  | ۰/۲۶۴  | ۰/۶۸۰  |
| درصد اشباع                        | ۰/۳۲۵  | ۰/۱۰۶  | -۰/۱۴۴ | -۰/۰۳۸ | -۰/۱۷۱ | ۰/۰۶۵  |
| PWP                               | ۰/۲۱۱  | ۰/۱۴   | -۰/۱۰۷ | -۰/۲۵۴ | -۰/۴۰۲ | -۰/۰۵  |
| FC                                | -۰/۰۳  | ۰/۱۲۳  | -۰/۶۴۳ | -۰/۰۹۱ | ۰/۱۰۹  | -۰/۱۸۴ |
| آب قابل دسترس                     | -۰/۰۹  | ۰/۰۸۵  | ۰/۶۲۲  | -۰/۰۲۲ | ۰/۲۲۳  | -۰/۱۷۳ |

## تجزیه عاملی (Factor Analysis) و تعیین وزن ویژگی‌ها

برای تعیین وزن ویژگی‌ها در دسته حداقل داده‌ها و همچنین در دسته کل داده‌ها از روش تجزیه عاملی استفاده شد و میزان مشارکت (Communality) یا وزن هر ویژگی در شاخص‌های کیفیت خاک تعیین شد. جدول ۳ نشان می‌دهد که ویژگی‌هایی مثل رطوبت در نقطه پژمردگی، رطوبت ظرفیت مزرعه، میانگین

وزنی قطر خاکدانه‌ها (خشک) و واکنش خاک در دو دسته ویژگی از وزن بیشتری برخوردارند. در دسته کل داده‌ها (TDS)، بیشترین و کمترین وزن به رطوبت در نقطه پژمردگی (۰/۰۷۲) و درصد سیلت (۰/۰۳۷) و در دسته حداقل داده‌ها (MDS)، بیشترین و کمترین وزن به ترتیب به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (۰/۱۸۴) و هدایت الکتریکی خاک (۰/۱۱۴) تعلق دارد.

جدول ۳. وزن ویژگی‌های کیفیت خاک در دو مجموعه TDS و MDS با استفاده از تجزیه عامل (FA)

| ویژگی           | TDS         |       | MDS         |       |
|-----------------|-------------|-------|-------------|-------|
|                 | Communality | وزن   | Communality | وزن   |
| KS (cm/h)       | ۰/۵۴۴       | ۰/۰۴۰ |             |       |
| چگالی ظاهری     | ۰/۹۰۵       | ۰/۰۶۷ | ۰/۶۳۲       | ۰/۱۲۱ |
| تخلخل کل        | ۰/۹۰۵       | ۰/۰۶۷ |             |       |
| تخلخل موئینه‌ای | ۰/۸۱۹       | ۰/۰۶۰ |             |       |
| شن              | ۰/۷۲۴       | ۰/۰۵۳ | ۰/۶۴۱       | ۰/۱۲۳ |
| سیلت            | ۰/۵۰۲       | ۰/۰۳۷ |             |       |
| رس              | ۰/۶۹۸       | ۰/۰۵۱ |             |       |
| ماده آلی        | ۰/۸۹۲       | ۰/۰۶۶ | ۰/۷۴۷       | ۰/۱۴۳ |
| MWD خشک         | ۰/۹۱۲       | ۰/۰۶۷ | ۰/۹۶۰       | ۰/۱۸۴ |
| MWD مرطوب       | ۰/۸۴۴       | ۰/۰۶۲ |             |       |
| GMD خشک         | ۰/۸۳۰       | ۰/۰۶۱ |             |       |
| GMD مرطوب       | ۰/۴۵۴       | ۰/۰۳۳ |             |       |
| pH              | ۰/۷۸۷       | ۰/۰۵۸ | ۰/۹۰۳       | ۰/۱۷۳ |
| هدایت الکتریکی  | ۰/۵۹۱       | ۰/۰۴۳ | ۰/۵۹۳       | ۰/۱۱۴ |
| درصد اشباع      | ۰/۶۲۵       | ۰/۰۴۶ |             |       |
| PWP             | ۰/۹۷۹       | ۰/۰۷۲ |             |       |
| FC              | ۰/۹۶۸       | ۰/۰۷۱ | ۰/۷۲۴       | ۰/۱۳۹ |
| AW              | ۰/۵۳۳       | ۰/۰۳۹ |             |       |

## تعیین شاخص‌های جامع کیفیت (IQI) و نمودار خاک (NQI)

پس از تعیین وزن هر ویژگی در دو مجموعه داده‌ها به کمک معادله (۱) و امتیازهای محاسبه شده به روش فازی برای هر نقطه نمونه برداری شده، کیفیت جامع فیزیکی خاک (IQI) محاسبه شد. خلاصه آماری IQI محاسبه شده در جدول ۴ دیده می‌شود. مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین  $IQI_{MDS}$  و  $IQI_{TDS}$  برابر ۰/۵۹۷ است که در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.

برای تعیین شاخص کیفیت نمودار (NQI) از معادله (۲) استفاده شد. امتیازات ویژگی‌ها از طریق معادله‌های فازی

برآورد شدند. بدین ترتیب برای هر نقطه نمونه برداری امتیازات هر ویژگی محاسبه و میانگین آن‌ها تعیین شد. ضریب همبستگی پیرسون بین  $NQI_{TDS}$  و  $NQI_{MDS}$  برابر ۰/۷۴۴ بود که در سطح ۰/۰۱ معنی دار بود (جدول ۴). با توجه به معنی دار بودن  $IQI_{MDS}$  و  $IQI_{TDS}$  از یک سو و  $NQI_{TDS}$  و  $NQI_{MDS}$  از دیگر سو، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌ها با حداقل داده برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک در منطقه مطالعاتی سریع‌تر و با صرفه اقتصادی بیشتر امکان پذیر است.

جدول ۴. مقایسه برخی ویژگی‌های آماری و همبستگی شاخص کیفیت خاک NQI و IQI بین دو مجموعه TDS و MDS با استفاده از آزمون t جفت‌شده (Paired Samples T-test) و همبستگی پیرسون

| شاخص   | SE $\pm$ میانگین   | بیشینه | کمینه | CV    | همبستگی پیرسون |
|--------|--------------------|--------|-------|-------|----------------|
| NQITDS | ۰/۳۹۰ $\pm$ ۰/۰۰۵a | ۰/۵۶   | ۰/۲۴  | ۱۳/۳۱ | ۰/۷۴۴**        |
| NQIMDS | ۰/۳۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۵a | ۰/۵۲   | ۰/۲۱  | ۱۳/۶۳ |                |
| IQITDS | ۰/۵۵۵ $\pm$ ۰/۰۰۶b | ۰/۷۵   | ۰/۳۶  | ۱۲/۳۵ | ۰/۵۹۷**        |
| QIMDS  | ۰/۶۰۵ $\pm$ ۰/۰۰۸c | ۰/۷۹   | ۰/۳۳  | ۱۵/۱۱ |                |

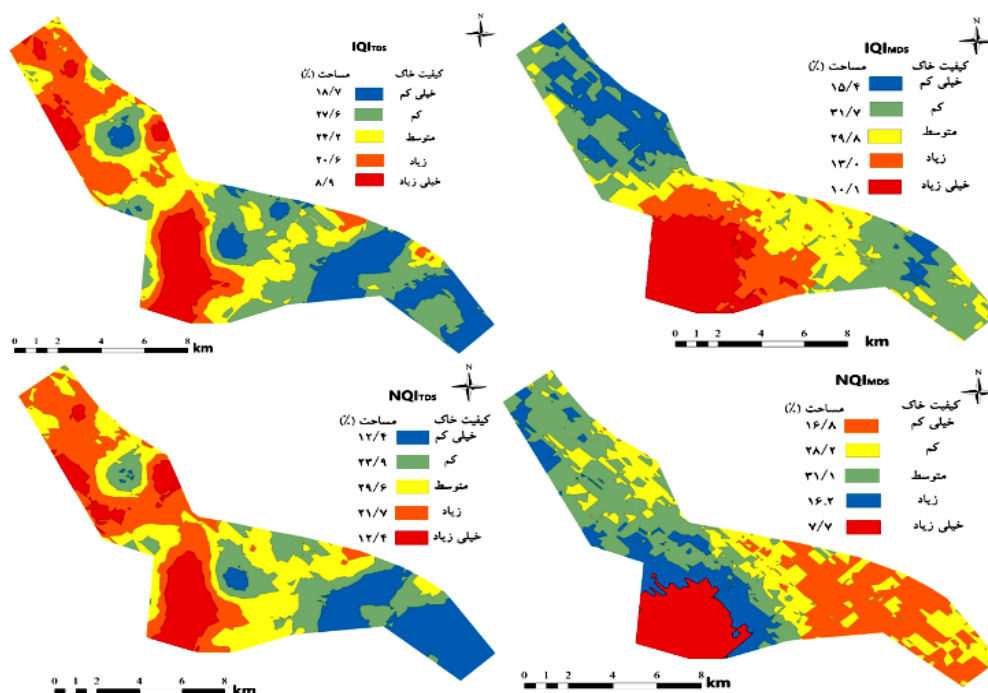
همچنین بررسی میانگین شاخص‌های NQITDS، NQIMDS، IQITDS و QIMDS برای کاربری‌های کشت آبی، کشت دیم و مرتع و مقایسه میانگین‌ها (Independent t-test) نشان داد که در هر چهار شاخص کیفیت خاک استفاده شده (NQITDS، NQIMDS، IQITDS و QIMDS)، بیشترین شاخص‌های کیفیت متعلق به خاک‌ها با کاربری مرتع است. با توجه به اینکه ویژگی‌های فیزیکی خاک در شاخص‌ها استفاده شدند، احتمالاً عملیات خاک‌ورزی در اراضی با کاربری دیم و آبی مهم‌ترین تأثیر منفی را بر کیفیت فیزیکی خاک داشته‌اند. این موضوع از سوی دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (۵). این‌گونه تخریب به احتمال قوی بر محیط‌زیست و کارایی اراضی کشاورزی تأثیرگذار است.

بررسی کیفیت خاک کاربری‌های کشاورزی آبی و دیم به کمک چهار شاخص استفاده شده نشان داد که این دو کاربری از نظر کیفیت خاک تفاوت معنی‌داری ندارند. چهار شاخص بررسی شده بیشترین ضریب تغییرات را در کاربری دیم نشان دادند. قرارگرفتن اراضی دیم روی اجزای مختلف منابع اراضی یا لندفرم‌ها با دامنه شیب متغیر احتمالاً منجر به افزایش ضریب تغییرات این خاک‌ها شده است.

#### پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک

برای پهنه‌بندی شاخص‌ها از روش زمین‌آمار و کریجینگ

معمولی استفاده شد. گرچه نرمال‌بودن داده‌ها برای انجام کریجینگ ضروری نیست؛ ولی در صورت نرمال‌بودن داده‌ها پهنه‌بندی انجام‌شده از کیفیت بیشتری برخوردار است (۲۰)؛ بنابراین آماره کلموگروف - اسمیرنوف برای مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک نقاط محاسبه شدند. شاخص IQITDS توزیع نرمال نداشت؛ بنابراین با تبدیل مقادیر شاخص‌ها به لگاریتم، اطلاعات کیفیت نرمال شدند. مشخصات نیم‌تغییرنماها برای شاخص‌های بررسی‌شده تعیین شدند. دامنه و سقف نیم‌تغییرنماها بررسی شد و با توجه به یکسان بودن آن‌ها در جهات مختلف جغرافیایی، تغییرنماها همسانگرد (Isotropic) بودند. مدل تغییرنمای برای همه شاخص‌ها گوسی و همبستگی مکانی آن‌ها ضعیف تا متوسط بود. پهنه‌بندی‌های شاخص‌های بررسی‌شده به روش شکست‌های طبیعی جنگز (۲۱) طبقه‌بندی شدند (شکل ۲). شکل ۲ نشان می‌دهد که خاک‌ها با کیفیت زیاد و خیلی زیاد در بخش جنوب غربی منطقه قرار دارند که بیشتر کاربری مرتع دارند. جدول ۱ نشان می‌دهد که درصد مواد آلی، میانگین وزنی خاکدانه‌ها، هدایت هیدرولیکی و تخلخل خاک مراتع نسبت به خاک‌های زیرکشت آبی و دیم بیشتر و چگالی ظاهری کمتر از دو کاربری‌های دیگر است. خاک‌ورزی اراضی زیرکشت آبی و دیم و کشت فشرده در کشت آبی ممکن است عامل کاهش کیفیت خاک این اراضی نسبت به خاک مراتع باشد.



شکل ۲. نقشه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از تخمین گر کریجینگ

در نظر گرفتن ۴ شاخص بررسی شده نشان می‌دهد که به‌طور متوسط ۷۱ درصد خاک‌های منطقه در شرایط کیفیت خیلی کم، کم و متوسط قرار دارند و بیشتر کاربری آن‌ها کشاورزی است؛ بنابراین ضروری است مدیریت این اراضی و کیفیت خاک در این مناطق در برنامه رصد قرار گیرد. ارزیابی کیفیت

پهنه‌بندی شاخص‌ها با استفاده از آماره‌های RMSE و MBE نشان داد که RMSE همه شاخص‌ها کمتر از ۰/۰۸۸ و MBE کلیه شاخص‌ها کمتر از ۰/۰۱۷ است و نشان‌دهنده کیفیت قابل قبول پهنه‌بندی‌ها هستند.

## منابع مورد استفاده

## References

- Andrews, S., C. Flora, J. Mitchell and D. Karlen. 2003. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma* 114(3-4): 187-213.
- Anonymous. 2013. Annual Statistics of Chaharmahal va Bakhtiari province. Organization of Management and Planning of Iran, The County's Government Assistant of Planning and Business (in Farsi).
- Armenise, E., M. Redmile-Gordon, A. Stellacci, A. Ciccacese and P. Rubino. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 130: 91-98.
- Askari M.S. and N. M. Holden. 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma* 230:131-142.
- Askari, M.S., J. Cui and N.M. Holden. 2013. The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil and Tillage Research* 134: 1-10.
- Castellini, M., A. M. Stellacci, E. Barca and M. Lovino. 2019. Application of multivariate analysis techniques for selecting soil physical quality indicators: A case study in long-term field experiments in Apulia (Southern Italy). *Soil Science Society America Journal* 83(3): 707-720.
- Chen, G., Z. Gao, L. Zu, L. Tang, T. Yong, X. Fong and T. Zhang. 2017. Soil aggregate characteristics and stability of soil carbon stocks in a *Pinus tabulaeformis* plantation. *New Forests* 48: 837-853.

8. Denef, K., J. Six, K. Paustian and R. Merckx. 2001. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 2145-2153.
9. Diodato, N. and M. Ceccarelli. 2004. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands. *Ecological Indicators* 4(3): 177-187.
10. Ditzler, C.A. and A.J. Tugel. 2002. Soil quality field tools: Experiences of USDA-NRCS soil quality institute. *Agronomy Journal* 94(1): 33-38.
11. Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. PP. 1-21. In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment (Volume 35)*, Soil Science Society of America, Special Publication, Modison.
12. Doran, J.W. and A.J. Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America, Special Publication, Modison.
13. Falahzadeh, J. and M. A. Hajabbasi. 2011. Changes of soil quality indices due to soil salinity reclamation of Abarkoh plain, in central Iran. *Journal of Water and Soil Science* 15(55): 139-151.
14. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis1. PP. 383-411. In: A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods*, Soil Science Society of America, Special Publication, Modison.
15. Govaerts, B., K.D. Sayre and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87(2): 163-174.
16. Khakipoor, N. 2024. Effects of land use changes on several soil quality indices in a part of Lahijan district, Gilan province. *Agriculture Engineering* 47(1): 19-34 (in Farsi).
17. Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. PP. 687-734. In: *Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods*, Soil Science Society of America, Special Publication, Modison.
18. Marshall, T. J., J. W. Holmes and C.W. Rose. 1999. *Soil Physics* (3ed). University Combridge Press, Combridge.
19. Marzaioli, R., R. D'ascoli, R. De Pascale and F. Rutigliano. 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology* 44(3): 205-212.
20. Mohammadi, J. 2006. *Pedommetry (Vol. 2: Spatial Statistics)*, Pelk Publisher, Tehran.
21. North, M. A. 2009. A method for implementing a statistically significant number of data classes in the Jenks algorithm. 6<sup>th</sup> Conference on fuzzy systems and knowledge discovery. Tianjin, China.
22. Rahmanipoor, F., H. A. Bahrami, S. Rahimi Bandarabadi and Z. Feraidoni. 2011. Quantitative soil quality evaluation and its spatial distribution in a part of crop lands of Ghazvin province. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 43(1): 1-8 (in Farsi).
23. Reynolds, W., B. Bowman, C. Drury, C. Tan and X. Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110(1-2): 131-146.
24. Shahabarkhazlo, H., G. Haghnia, H. Emami. 2012. Evaluation of soil quality models and their indices in croplands and rangelands of southern Mashhad. *Iranian Journal of Soil Research* 26(3) : 227-234 (in Farsi).
25. Sharma, S. B. Lishika, Sh. Kaushal and Sh. Kaushal. 2023. Soil quality indicators: A comprehensive review. *International Journal of Plant Soil Science* 35(22): 315-325.
26. Sonmez, S., D. Buyuktas, F. Okturen and S. Citak. 2008. Assessment of different soil to water ratios (1: 1, 1: 2.5, 1: 5) in soil salinity studies. *Geoderma* 144(1-2): 361-369.
27. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37(1): 29-38.
28. Yenene, N., E. Elias and G. L. Feyisa. 2024. Monitoring soil quality of different land use systems: A case study in Suhawatershed northwestern highlands of Etiopia. *Environmental System Research* 13(1):7.
29. Yoder, R.E. 1936. A Direct Method of Aggregate Analysis of Soils and a Study of the Physical Nature of Erosion Losses 1. *Agronomy Journal* 28(5): 337-351.
30. Yu, P., S. Liu, L. Zhang, Q. Li, D. Zhou. 2018. Selecting the minimum data set and qualitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of Total Environment* 616: 564-571.