



Assessment of Soil Physical Quality Indices across Different Erodibility Classes Based on the Williams Erodibility (Case Study: Zanjan Province)

Ali Reza Vaezi¹ | Mortaza Yavari² | Mohammad Sadegh Askari³

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail:

vaezi.alireza@gmail.com; vaezi.alireza@znu.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: mortazayavari90@gmail.com

3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: askari@znu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 1, 2026

Revised: July. 23, 2026

Accepted: Aug. 16, 2026

Published online: Oct. 23, 2026

Keywords:

**Aggregate stability,
Non-linear score,
Semi – arid region of zanjan,
Soil erodibility,
Soil erosion.**

ABSTRACT

Soil erodibility is one of the key indicators of soil quality and is directly influenced by soil physical properties. This study aimed to Assessment soil physical quality indices and identify the most sensitive indicators across different soil erodibility classes in the semi-arid region of Zanjan Province, Iran. For this purpose, 20 soil physical properties were measured at 68 sampling points, including rangeland (45 points), cropland (13 points), orchard (8 points), and forest (2 points) land uses. Soils were classified into three erodibility classes based on the Williams erodibility factor. Differences among physical properties across erodibility classes were assessed using one-way ANOVA. Soil physical quality indices (SQI) were calculated using linear and nonlinear scoring functions with both simple and weighted approaches for the total dataset (TDS) and minimum dataset (MDS), and were compared using discriminant analysis. Principal Component Analysis (PCA) identified three main components explaining 83% of the total variance. In the TDS, sand content, mean weight diameter of primary particles (MWDp), and mean weight diameter of dry aggregates (MWDdry) had the highest weights ($W = 0.12$, $p < 0.01$). In the MDS, sand content was the most important factor ($W = 0.57$, $p < 0.01$), followed by wet mean geometric diameter of aggregates (GMDwet) and MWDdry ($W = 0.32$ and 0.10 , respectively). These findings indicate that, in the TDS, primary particle-size distribution, particularly sand content, together with aggregate size, especially MWDdry, were the main determinants of soil physical quality based on the soil erodibility index, whereas in the MDS, sand content was the dominant indicator. Discriminant analysis indicated that the best soil physical quality index for erodibility assessment was the weighted linear scoring method based on the TDS (SQI-2). Overall, soil structure stability and PSD were identified as effective tools for monitoring soil physical quality.

Cite this article: Vaezi, A. R., Yavari, M., Askari, M. S., (2026) Assessment of Soil Physical Quality Indices across Different Erodibility Classes Based on the Williams Erodibility (Case Study: Zanjan Province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (8), 2025-2043. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412666.670121>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412666.670121>



EXTENDED ABSTRACT

Background and purpose

Soil physical quality is a key component of soil quality and plays an important role in ecosystem sustainability and land productivity. Soil erodibility is one of the most important indicators of physical soil quality, reflecting soil susceptibility to erosion processes. However, comprehensive assessments of soil physical quality indices in relation to soil erodibility have received limited attention in semi-arid regions of Iran. Accordingly, the overall objectives of this study were to: (1) quantitatively and comprehensively evaluate soil physical quality indices using discriminant analysis based on the Total Data Set (TDS) and the Minimum Data Set (MDS), employing both linear and non-linear scoring methods across different soil erodibility classes defined by the Williams erodibility factor; and (2) identify the most sensitive soil quality indicators under both datasets in selected soils of the semi-arid region of Zanjan Province, Iran.

Materials and methods

This research was conducted in the semi-arid region of Zanjan. In order to quantitatively evaluate the physical quality indicators of soil in different erodibility classes, the sampling operation was designed to be a comprehensive representation of the soil conditions in the studied semi-arid region. Sampling points were determined by considering criteria such as land use type, vegetation cover, soil texture, and information obtained from soil maps and field surveys. In total, disturbed soil samples (depth 0 to 60 cm) and undisturbed soil samples (depth 0 to 30 cm) were collected from 68 selected points. A total of 20 physical properties were measured for this research. To measure soil permeability in the field, experiments were conducted using the double-ring infiltrometer method. The cumulative water infiltration was measured at time intervals of 0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, and 90 minutes until steady-state infiltration was reached. Based on the obtained data, water infiltration indices including Cumulative Infiltration (CI), Final Infiltration Rate (FIR), and Mean Infiltration Rate (MIR) were calculated. The particle size distribution of particles larger than 0.05 mm was obtained using the dry sieving method according to the standard guidelines of Gee & Bauder (1986). Particles smaller than 0.05 mm were measured by the hydrometer method based on the method of Yavari et al. (2021). Furthermore, the standard methods presented by Gee & Bauder (1986) were used to measure particles larger than 2 mm. Bulk density was measured using a metal cylinder (Culley, 1993). Electrical conductivity and soil reaction were measured in the saturated paste extract (Thomas, 1996), along with organic matter (Walkley & Black, 1934) and calcium carbonate equivalent (Page et al., 1982). The weighted mean diameter (MWD_p) and geometric mean diameter (d_g) of primary soil particles were calculated using the results of the primary particle size distribution. The wet sieving method was used to determine aggregate stability, and dry sieving was used for the mean weight diameter of aggregates. For this purpose, the weighted mean diameter ($MWD_{wet \text{ and dry}}$) and geometric mean diameter ($GMD_{wet \text{ and dry}}$) of aggregates were measured in both wet and dry conditions. Soil Structure Stability Index (SSI), Degree of Compactness (DC), Relative Aggregate Stability Index (SI), Overall Aggregate Stability (OAS), and Effective Infiltration Depth (EID) were also calculated.

Soil erodibility (K) was determined using the method of Williams (1990). In order to reduce data dimensions and identify suitable properties for developing a soil quality index, Principal Component Analysis (PCA) was performed on the Total Data Set (TDS) to derive the Minimum Data Set (MDS). For this purpose, the number of selectable components was determined based on the scree plot and the break point of the eigenvalue curve (Askari & Holden, 2015; Brejda et al., 2000). The SQI index was calculated using two methods Simple and Weighted and with two scoring approaches Linear and Non-linear for both data sets: the TDS and the MDS. To examine the correlation between soil physical properties, the Pearson correlation matrix was calculated. To better understand the internal structure of the data and reduce the dimensions of correlated variables, Principal Component Analysis (PCA) was utilized. Finally, the comparison and significance of differences in the obtained SQI index values were evaluated using discriminant analysis. Data analysis, graphing, and comparison of means were performed using Excel (2016) and SPSS (2022) software.

Results

Among the 20 measured properties, 10 showed significant differences among soil erodibility classes ($P < 0.05$), including sand and silt contents, MWD_p , d_g , MWD_{dry} , MWD_{wet} , GMD_{wet} , SSI, SI, and EID. Principal Component Analysis identified three principal components explaining 83% of the total variance. Sand content, GMD_{wet} , and MWD_{dry} were selected as the most representative indicators of soil physical quality in the MDS. Sand content showed the highest contribution (weight = 0.57), followed by GMD_{wet} (0.32) and MWD_{dry} (0.10). Discriminant analysis demonstrated a strong capability of SQI for differentiating soil erodibility classes, with the first discriminant function explaining 92.48% of the total variance. Among the evaluated methods, the

weighted SQI based on the TDS with linear scoring exhibited the highest discrimination coefficient (33.04).

Conclusion

The studied soils were predominantly classified as moderately to highly erodible. Soil physical quality decreased with increasing erodibility, highlighting the close relationship between soil degradation and erosion susceptibility. Indicators related to particle-size distribution and aggregate stability were identified as the most influential factors controlling soil erodibility and soil physical quality. The results demonstrate that soil quality indices, particularly those based on weighted approaches, can serve as effective tools for monitoring soil degradation and supporting sustainable soil management in semi-arid regions.

Funding

This study was conducted with the equipment support of the Department of Soil Science and Engineering and with the financial and moral support of the Vice Chancellor for Research of the University of Zanjan. Financial support for this research was provided by the Faculty of Agriculture, University of Zanjan, in the form of a graduate thesis grant for the first author and research grants for the co-authors.

Authorship contribution

All authors contributed substantially to the study. They participated in the design and implementation of the research, data collection, statistical analyses, interpretation of results, manuscript preparation, revision, and final approval of the manuscript. The contributions of the authors in this thesis-derived manuscript were approximately as follows:

- First Author (Graduate Student): Sample preparation, conducting experiments, data collection, performing calculations, statistical analyses, interpretation of results, and preparation of the manuscript draft.
- Second Author (Supervisor): Research design, supervision of the research process, evaluation of results, manuscript revision, and finalization of the manuscript.
- Third Author (Advisor): Research supervision, manuscript review, and revision

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

This manuscript is the result of field research and direct writing by the authors. No generative artificial intelligence or AI-assisted technologies were used at any stage of the research or manuscript preparation. The authors take full responsibility for the content of the manuscript.

Data availability statement

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Vice Chancellor for Research of the University of Zanjan for the financial support provided for this study.

Ethical considerations

This research was approved by the Department of Soil Science and the Faculty of Agriculture Council of the University of Zanjan in accordance with the relevant regulations. The authors confirm that all ethical principles related to conducting and publishing scientific research have been fully observed.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript.

ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در کلاس‌های مختلف فرسایش پذیری بر مبنای شاخص ویلیامز (مطالعه موردی استان زنجان)

علی‌رضا واعظی^۱ | مرتضی یآوری^۲ | محمدصادق عسکری^۳

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: vaezi.alireza@gmail.com;

vaezi.alireza@znu.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: mortazayavari90@gmail.com

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: askari@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱/۲۹	فرسایش پذیری خاک یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت خاک است که تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک قرار دارد. هدف این پژوهش ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک و شناسایی حساس‌ترین شناسه‌های آن بر مبنای کلاس‌های مختلف فرسایش پذیری در منطقه نیمه‌خشک زنجان است. بدین منظور، ۲۰ ویژگی فیزیکی خاک در ۶۸ نقطه نمونه برداری (کاربری‌های مرتع، زراعت، باغ و جنگل به ترتیب ۴۵، ۱۳، ۸ و ۲ نقطه) اندازه‌گیری و بر اساس عامل فرسایش پذیری ویلیامز در سه کلاس طبقه‌بندی شدند. تفاوت ویژگی‌های فیزیکی در کلاس‌های فرسایش پذیری با استفاده از تحلیل ANOVA انجام شد. شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک (SQI) با استفاده از توابع نمره‌دهی خطی و غیرخطی و با روش‌های ساده و وزنی برای مجموعه داده کامل (TDS) و مجموعه داده حداقل (MDS) محاسبه و با تحلیل تشخیصی مقایسه شدند. نتایج تحلیل PCA سه مؤلفه اصلی را شناسایی کرد که ۸۳ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین نمود. در TDS درصد شن، میانگین وزنی قطر ذرات اولیه (MWDp) و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها با الگ خشک (MWDdry) بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند ($W = 0.12$).
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۱	($p < 0.01$). همچنین در MDS، درصد شن ($W = 0.57$, $p < 0.01$) مهم‌ترین عامل بود و پس از آن میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها با الگ تر (GMDwet) و MWDdry قرار گرفتند (به ترتیب $W = 0.32$, $p < 0.01$).
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۵	بدین ترتیب در مقیاس TDS توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به‌ویژه درصد شن و متوسط اندازه خاک‌دانه‌ها به‌ویژه MWDdry و در مقیاس MDS نیز درصد شن، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده افزایش کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای شاخص فرسایش پذیری بودند. نتایج حاصل از تحلیل تشخیص نیز نشان داد که بهترین شاخص کیفیت فیزیکی برای فرسایش پذیری خاک مربوط به نمره‌دهی خطی با روش وزنی در TDS بود (2 - SQI). پایداری ساختمان خاک و PSD ابزارهای مؤثری برای پایش کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای فرسایش پذیری هستند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۸/۱	
واژه‌های کلیدی: پایداری خاک‌دانه‌ها، فرسایش پذیری، فرسایش خاک، منطقه نیمه‌خشک زنجان، نمره‌دهی غیرخطی.	

استناد: واعظی، علیرضا، یآوری، مرتضی، عسکری، محمدصادق، (۱۴۰۵) ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در کلاس‌های مختلف فرسایش پذیری بر مبنای شاخص ویلیامز (مطالعه موردی استان زنجان)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۸)، ۲۰۲۵-۲۰۴۳.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412666.670121>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412666.670121>

مقدمه

خاک مهم‌ترین بستر رشد گیاه است که با فراهم کردن شرایط لازم برای تداوم حیات و سلامت موجودات زنده، نقش اساسی در چرخه مواد غذایی و ماده آلی، ذخیره و تأمین عناصر غذایی گیاه، غیرفعال‌سازی آلاینده‌ها، پالایش آب، ذخیره‌سازی کربن و تعدیل اقلیم ایفا می‌کند (Lal, 2016). ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و بوم‌شناختی خاک، هر کدام نقش مهمی در نگهداشت و انتقال آب، چرخه مواد غذایی، تجزیه بقایا، تنظیم اقلیم و رشد گیاه ایفا می‌کنند و در مجموع عملکرد اکوسیستمی خاک را کنترل می‌کنند (Lal, 2016). شاخص کیفیت خاک به‌طور کلی به توانایی خاک در عملکرد مؤثر اکوسیستم برای حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، سلامت گیاه و حیوان و حفاظت از محیط زیست اطلاق می‌شود (Doran & Parkin, 1994). این شاخص بر اساس عملکردهای خاک تعریف می‌شود (Ritz et al., 2009). شاخص‌های کیفیت خاک (SQI) ابزارهایی هستند که ویژگی‌های خاک را به یک شاخص یک‌پارچه تبدیل می‌کنند (Askari & Holden, 2014). توسعه شاخص‌های کیفیت خاک معمولاً شامل انتخاب شناسه‌های کلیدی، امتیازدهی آن‌ها و ادغام در یک شاخص یک‌پارچه است (Qi et al., 2014; Bastida et al., 2006; Askari & Holden, 2014). در این میان کیفیت فیزیکی خاک یکی از اجزای کلیدی کیفیت خاک است که نقش تعیین‌کننده‌ای در سلامت کلی و بهره‌وری اکوسیستم‌ها داشته و برای کشاورزی پایدار حیاتی است (Pal & Bhattacharya, 2024). یکی از مهم‌ترین شناسه‌های کیفیت فیزیکی خاک فرسایش‌پذیری است. این ویژگی بیانگر حساسیت خاک به جداسازی و انتقال ذرات در اثر عوامل فرسایشی به‌ویژه بارش و رواناب می‌باشد (Poesen, 2018; Bünemann et al., 2018).

فرسایش‌پذیری خاک به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله توزیع اندازه ذرات، پایداری خاک‌دانه‌ها، ماده آلی و نوع پیوندهای بین ذرات قرار دارد (Bünemann et al., 2018). خاک‌هایی با فرسایش‌پذیری بالا معمولاً با تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری، افزایش رواناب سطحی و افت حاصلخیزی همراه هستند (Poesen, 2018). در این میان خاک‌هایی با ساختمان ضعیف، پایداری کم خاک‌دانه‌ها، تراکم زیاد و تخلخل کم بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر فرسایش دارند (Morgan, 2009; Poesen et al., 2003). همچنین، کاهش ماده آلی خاک و تغییر کاربری اراضی نیز موجب افزایش شدت فرسایش می‌شود (Wu et al., 2024). بنابراین، ارزیابی کمی شاخص‌های فیزیکی خاک مانند چگالی ظاهری، پایداری خاک‌دانه‌ها، تخلخل و هدایت هیدرولیکی نه تنها کیفیت خاک را نشان می‌دهد، بلکه امکان پیش‌بینی فرسایش‌پذیری و شناسایی خاک‌های حساس به تخریب را نیز فراهم می‌کند (Bünemann et al., 2018; Costantini et al., 2022). معادلات مختلفی برای ارزیابی شاخص فرسایش‌پذیری خاک ارائه شده است که می‌توان به معادله ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1978) و ویلیامز (Williams, 1990) اشاره کرد. در این میان معادله ویلیامز به دلیل استفاده از داده‌های قابل دسترس (توزیع اندازه ذرات اولیه و کربن آلی) به‌آسانی قابل استفاده است.

مطالعات مختلفی در خصوص فرسایش‌پذیری و ارزیابی کیفیت خاک توسط پژوهش‌گران انجام شده است. در این میان پژوهش‌های Morgan, (2009) و Poesen et al., (2003) نشان داده‌اند که ویژگی‌هایی نظیر بافت خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، ماده آلی و هدایت هیدرولیکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده فرسایش‌پذیری خاک هستند. در پژوهشی دیگر Wu et al., (2024) نیز نشان داده‌اند که تغییر کاربری اراضی و کاهش ماده آلی خاک می‌تواند موجب افزایش فرسایش‌پذیری و کاهش کیفیت خاک شوند. Bünemann et al. (2018) نیز بیان کردند که شاخص‌های کیفیت خاک ابزارهای مناسبی برای ارزیابی سلامت خاک و پایداری اکوسیستم‌ها هستند. علاوه بر این، Bedolla-Rivera et al. (2023) و Askari & Holden, (2014) نشان دادند که استفاده از مجموعه حداقل داده‌ها ضمن حفظ دقت ارزیابی، هزینه‌های پایش کیفیت خاک را کاهش می‌دهد. در ایران نیز پژوهش‌های مختلفی در زمینه فرسایش‌پذیری خاک انجام شده است. در پژوهشی Vaezi et al., (2018) در بررسی‌های خود در شرایط نیمه‌خشک ایران نشان دادند که حساسیت خاک به فرسایش به‌طور معنی‌داری با توزیع اندازه خاک‌دانه‌ها در ارتباط است. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که خاک‌های با خاک‌دانه‌های ناپایدارتر، در برابر ضربه قطرات باران و جریان سطحی، فرسایش‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند. فرسایش‌پذیری خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر کیفیت خاک است و شاخص‌های کیفیت خاک می‌توانند به‌خوبی وضعیت تخریب خاک را منعکس کنند. از این رو در پژوهشی Nosrati, (2019) and Adrian (2019) با توسعه یک شاخص کیفیت خاک در حوضه‌های کوهستانی ایران نشان دادند که کیفیت خاک به‌شدت تحت تأثیر فرسایش قرار دارد و برخی ویژگی‌های خاک می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های حساس برای ارزیابی تخریب خاک مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، Karkaj et al., (2019) نیز در مراتع نیمه‌خشک شمال غرب ایران نشان دادند که انتخاب شاخص‌های حساس و کارآمد ضمن



کاهش هزینه‌های اندازه‌گیری، دقت ارزیابی کیفیت خاک را حفظ می‌کند

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه ارزیابی کیفیت خاک و فرسایش‌پذیری، هنوز خلأهای پژوهشی مهمی وجود دارد. مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی جداگانه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک یا فرسایش‌پذیری متمرکز بوده‌اند و ارزیابی همزمان این دو شاخص در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک ایران و حتی جهان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین پژوهش‌های اندکی در خصوص ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای فرسایش‌پذیری، تحلیل روابط میان آن‌ها و شناسایی حساس‌ترین شناسه‌های کیفیت خاک برای پایش سریع وضعیت خاک در شرایط نیمه‌خشک انجام شده است. بر این اساس، هدف کلی این پژوهش: (۱) ارزیابی کمی و جامع شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از تحلیل تشخیصی در دو مقیاس مجموعه کامل داده‌ها و مجموعه حداقل داده‌ها با دو روش خطی و غیر خطی، در کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری بر اساس عامل فرسایش‌پذیری ویلیامز و (۲) شناسایی حساس‌ترین شناسه‌های کیفیت خاک در این دو مقیاس در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک زنجان است. ارزیابی همزمان شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای فرسایش‌پذیری، علاوه بر روشن ساختن ارتباط بین کیفیت فیزیکی خاک و فرسایش‌پذیری، امکان شناسایی حساس‌ترین شاخص‌ها را برای پایش سریع تخریب خاک فراهم می‌کند. همچنین، چنین ارزیابی جامعی در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک ایران تاکنون به‌ندرت انجام شده و می‌تواند در انتخاب شاخص‌های مناسب برای مدیریت و حفاظت خاک، مدیریت پایدار زمین، تدوین راهبردهای کاهش فرسایش و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و آزمایش‌های صحرائی

این پژوهش به‌منظور ارزیابی کمی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری در منطقه نیمه‌خشک زنجان انجام شد. ویژگی‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه، شامل موقعیت جغرافیایی، شرایط اقلیمی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و خاک‌شناسی، طراحی نمونه‌برداری، نحوه انتخاب نقاط نمونه‌برداری، روش برداشت نمونه‌های خاک و همچنین جزئیات اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و روش انجام آزمایش نفوذ آب در مقاله پیشین نگارندگان به‌طور کامل ارائه شده است (یاوری و همکاران، ۱۴۰۴). در مجموع از ۶۸ نقطه انتخابی نمونه‌های خاک به‌صورت دست‌خورده (صفر تا ۶۰ سانتی‌متری) و دست‌نخورده (صفر تا ۲۰ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری) برداشت شد (Brady and Weil, 2017). برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک در صحرا آزمایش‌هایی با استفاده از روش حلقه دوگانه انجام شد. بر اساس داده‌های حاصله شاخص‌های نفوذ آب شامل نفوذ تجمعی (CI)، شدت نفوذ نهایی (FIR) و شدت نفوذ متوسط (MIR) محاسبه گردید. این شاخص‌ها برای ارزیابی کمی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک برای کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری مورد استفاده قرار گرفتند.

تجزیه‌های آزمایشگاهی

توزیع اندازه ذرات درشت‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر با استفاده از روش الک خشک مطابق دستورالعمل‌های استاندارد (Gee & Bauder, 1986) بدست آمد. ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر نیز به‌روش هیدرومتری براساس روش یاوری و همکاران (۱۳۹۹) اندازه‌گیری شد. همچنین برای اندازه‌گیری ذرات درشت‌تر از دو میلی‌متر از روش‌های استاندارد ارائه‌شده توسط Gee & Bauder, (1986) استفاده شد. اندازه‌گیری چگالی ظاهری با استفاده از سیلندر فلزی (Culley, 1993) انجام گرفت. قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک در عصاره گل اشباع (Thomas, 1996)، ماده آلی (Walkley & Black, 1934) و کربنات کلسیم معادل (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شدند. میانگین وزنی (MWD_p) و هندسی (d_g) قطر ذرات اولیه خاک با استفاده از نتایج توزیع اندازه ذرات اولیه خاک محاسبه شدند. بدین‌منظور میانگین وزنی (MWD_p) با استفاده از رابطه ۱ و میانگین هندسی (d_g) از روابط ۲ و ۳ تعیین شد.

$$MWD_p = \frac{(0.026 \times Si) + (0.001 \times C) + (1.025 \times S)}{1.037} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln(m_i) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$d_g = \exp(a) \quad \text{رابطه ۳}$$

در این روابط، MWD_p: میانگین وزنی قطر ذرات اولیه خاک، Si: سیلت، C: رس، S: شن، d_g: میانگین هندسی قطر ذرات اولیه

(mm)، f_i : درصد نسبی ذرات اولیه (m_i ، %): میانگین قطر ذرات در بازه مورد نظر (mm) و n : تعداد ذره است. برای تعیین پایداری خاک‌دانه‌ها از روش الک تر و متوسط قطر خاک‌دانه‌ها از الک خشک استفاده شد و میانگین وزنی ($MWD_{wet \text{ and } dry}$) و میانگین هندسی ($GMD_{wet \text{ and } dry}$) قطر خاک‌دانه‌ها در دو حالت تر (wet) و خشک (dry) اندازه‌گیری شدند. شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$SSI = \frac{1.724 OC}{(Silt + Clay)} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه، SSI: شاخص پایداری ساختمان خاک، OC: درصد کربن آلی خاک و silt+clay: مجموع مقدار ذرات رس و سیلت خاک است. سطوح SSI بیشتر از ۹ درصد به‌عنوان ساختمان پایدار، بین ۹ و ۷ درصد به‌عنوان تخریب ساختمان خاک با ریسک کم، بین ۷ و ۵ درصد به‌عنوان تخریب ساختمان خاک با ریسک بالا و کمتر از ۵ درصد به‌عنوان ساختمان کاملاً تخریب شده خاک شناخته شده است. درجه فشردگی خاک با استفاده از رابطه ۵ و ۶ محاسبه شد:

$$BD_{LLWR} = 0.00078 \text{ Clay} + 1.83803 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$DC = \frac{BD}{BD_{LLWR}} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

که در این رابطه، DC: درجه فشردگی خاک (%، BD: چگالی ظاهری مزرعه (g/cm^3) و BD_{LLWR} : چگالی ظاهری مرجع است. در رابطه ۵، Clay برابر است با مقدار رس خاک (g/kg). شاخص پایداری نسبی خاک‌دانه‌ها (SI) بیانگر درجه پایداری خاک‌دانه‌ها در برابر فرآیند خیس شدن خاک‌دانه‌ها است. پایداری کلی خاک‌دانه‌ها (OAS) نیز یک شاخص ترکیبی است که برای توصیف پایداری عمومی خاک‌دانه‌ها در برابر نیروهای تخریب‌کننده (مانند تر شدن، ضربه قطرات باران و نفوذ آب) به‌کار می‌رود. این دو شاخص با استفاده از نسبت میانگین وزنی خاک‌دانه‌ها در حالت تر و خشک بدست آمد. عمق مؤثر نفوذ نیز با روش Hillel, (1982) بر اساس قانون بقای جرم محاسبه شد. فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد (Williams, 1990):

$$K = 0.2 + 0.3 \exp(0.0256 \times Sa \times \left(1 - \frac{Si}{100}\right)) \times \left(\frac{Si}{Cl + Si}\right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25 \times C}{C + \exp(3.72 - 2.95 C)}\right) \times \left(1 - \frac{0.7 \times SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9 SN)}\right) \times 0.1317 \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن K: عامل فرسایش‌پذیری خاک ($ton \ h \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$); C: درصد کربن آلی خاک (%، Sa: درصد شن (%، Si: درصد سیلت (%، Cl: درصد رس (% و SN: $1 - (Sa/100)$ است. در شکل ۱ انجام آزمایش‌های صحرایی، نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است



شکل ۱. آزمایش‌های صحرایی، نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی



تعیین مجموعه داده‌ها

به‌منظور تعیین شناسه‌های مناسب برای توسعه شاخص کیفیت خاک و تعیین مجموعه کامل داده‌ها (TDS)، ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک بر اساس عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) محاسبه شده با روش Williams, (1990) طبقه‌بندی شدند. این شاخص بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش آبی بوده و تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف، نظیر توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و مقدار کربن آلی قرار دارد. کلاس‌های فرسایش‌پذیری خاک (Wischmeier & Smith, 1978) در جدول ۱ ارائه شده است. تفاوت میانگین مقادیر هر یک از ویژگی‌های فیزیکی خاک بین کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌هایی که اختلاف معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) بین حداقل دو کلاس فرسایش‌پذیری نشان دادند به‌عنوان متغیرهای حساس به تغییرات فرسایش‌پذیری خاک شناسایی شدند. همچنین به‌منظور کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی ویژگی‌های مناسب برای توسعه شاخص کیفیت خاک، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای مجموعه کامل داده‌ها (TDS) انجام شد تا مجموعه داده حداقل (MDS) استخراج شود. بدین‌منظور تعداد مؤلفه‌های قابل‌انتخاب بر اساس نمودار اسکرپلات و نقطه شکست منحنی ویژه تعیین شد (Askari & Holden, 2000; Brejda et al., 2015). در این میان متغیرهایی که دارای بالاترین بار عاملی (۱۰ درصد بالاترین وزن) در هر مؤلفه بودند، به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های اثرگذار انتخاب شدند (Askari & Holden, 2015). در صورتی که در هر مؤلفه بیش از یک متغیر حائز شرایط انتخاب بود؛ متغیرهایی با همبستگی بالا ($r > 0.7$) و وزن پایین‌تر برای جلوگیری از هم‌پوشانی حذف شدند.

جدول ۱. کلاس‌های فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد بررسی

گروه	کلاس فرسایش‌پذیری	K (ton h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
اول	کم	< 0.03
دوم	متوسط	$0.03 - 0.04$
سوم	زیاد	> 0.04

توسعه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

به‌منظور ارزیابی توان تبیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک در تفکیک کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری، شاخص SQI به دو روش ساده (Simple) و وزنی (Weighted) و با دو رویکرد نمردهی خطی و غیرخطی برای هر دو مجموعه داده شامل مجموعه کامل (TDS) و مجموعه حداقل (MDS) محاسبه شدند. مقادیر شناسه‌های کیفیت خاک با استفاده از توابع نمردهی خطی و غیرخطی به مقیاس استاندارد ۰ تا ۱ تبدیل شدند. بر اساس نقش عملکردی، شناسه‌ها در گروه‌های هرچه بیشتر بهتر^۲، هرچه کمتر بهتر^۴ و حد بهینه^۵ طبقه‌بندی شدند. در مرحله بعد، وزندهی ویژگی‌ها با استفاده از نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای هر دو مجموعه TDS و MDS انجام شد که بیانگر سهم واقعی هر ویژگی در تبیین تغییرات کیفیت فیزیکی خاک است (Ibrahim et al., 2025). برای نمردهی خطی از روابط ۸ و ۹ بهره گرفته شد. همچنین برای نمردهی غیرخطی متغیرهایی که دارای حد مجانبی میل‌کننده به صفر و یک بودند، از رابطه سیگموئیدی (رابطه ۱۰) استفاده شد (Bastida et al., 2006). کیفیت فیزیکی خاک‌ها نیز به‌ترتیب به‌روش ساده و وزنی بر اساس روابط ۱۱ و ۱۲ تعیین گردید.

$$S_L = (x - l/h - l) \quad \text{رابطه ۸}$$

$$S_L = 1 - (x - l/h - l) \quad \text{رابطه ۹}$$

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + (X/X_0)^b} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$SQI_A = \sum_{i=1}^n S_i/n \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$SQI_{WA} = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad \text{رابطه ۱۲}$$

1Total Data Set

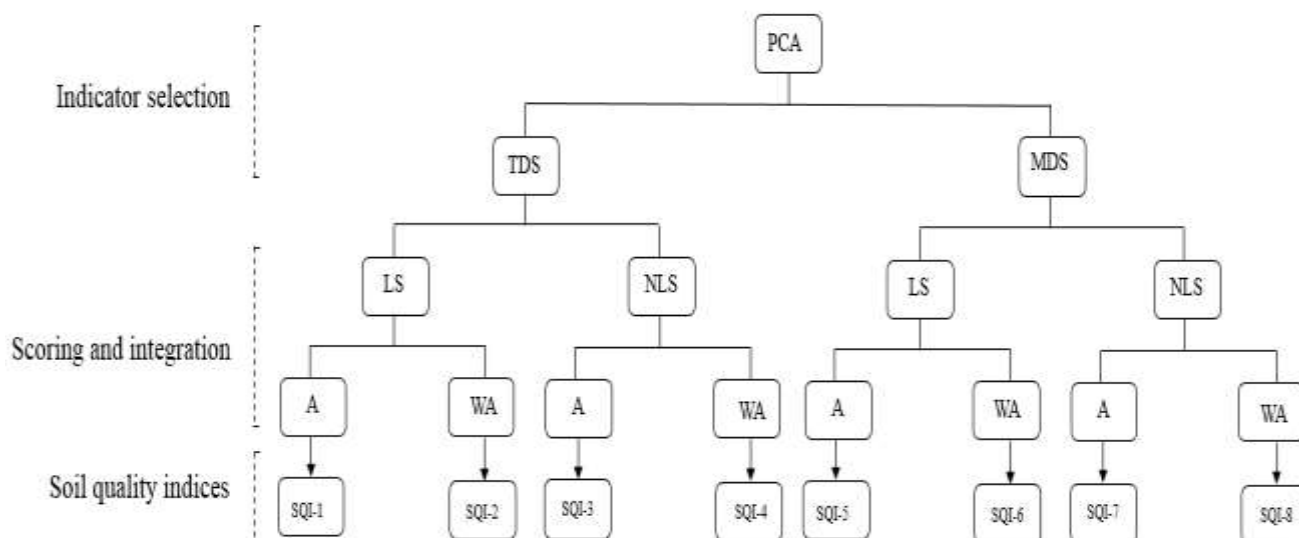
2Minimum Data Set

3More is Better

4Less is Better

5Mid Point Optimum

که در آن‌ها، S_L : نمره‌دهی خطی شناسه‌های فیزیکی خاک است که حداقل آن صفر و حداکثر آن ۱ است (Masto et al., 2008; Askari & Holden, 2015)، x : مقدار متغیر خاک، l : حداقل مقدار، h : حداکثر مقدار، S_{NL} : نمره‌دهی غیرخطی شناسه‌های فیزیکی خاک (بین صفر و ۱)، X_0 : میانگین مقدار ویژگی، b : شیب معادله غیرخطی است که مقدار آن برای ویژگی هرچه کمتر بهتر ۲/۵ و برای ویژگی هرچه بیشتر بهتر ۲/۵- (Sinha et al., 2009; Zhang et al., 2011, Askari & Holden, 2015)، n : تعداد شناسه‌ها، S_i : نمره شاخص‌ها، W_i : وزن هر شناسه بر اساس واریانس هر مؤلفه اصلی، SQI_A : مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک با روش ساده و SOI_{WA} : مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک با روش وزنی است. نمودار فرآیند توسعه شاخص‌های کیفیت خاک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار فرآیند توسعه شاخص‌های کیفیت خاک. PCA: تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، TDS: مجموعه کامل داده‌ها، MDS: مجموعه حداقل داده‌ها، LS: نمره‌دهی خطی، NLS: نمره‌دهی غیرخطی، A: روش ساده، WA: روش وزنی، SQI: شاخص کیفیت خاک.

تحلیل آماری

به‌منظور بررسی و ارزیابی تغییرات شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری، مجموعه‌ای از روش‌های آماری توصیفی و استنباطی استفاده شد. آماره‌های توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار برای تمامی ویژگی‌های فیزیکی خاک محاسبه شد تا توزیع و پراکندگی داده‌ها مشخص شود. نرمال بودن ویژگی‌های فیزیکی خاک با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت. داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی نمی‌کردند، با تبدیل لگاریتمی نرمال‌سازی شدند تا پیش‌فرض‌های آزمون‌های پارامتری رعایت شود. برای بررسی همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی خاک ماتریس همبستگی پیرسون محاسبه شد. این تحلیل امکان شناسایی روابط مستقیم و معکوس بین شاخص‌ها را فراهم ساخت. تفاوت میانگین مقادیر هر یک از ویژگی‌های فیزیکی خاک با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) مورد بررسی قرار گرفت. برای درک بهتر ساختار درونی داده‌ها و کاهش ابعاد متغیرهای همبسته از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بهره گرفته شد. به‌منظور انجام تحلیل‌های چندمتغیره، ویژگی‌های خاک با استفاده از روش نمره‌گذاری Z (استانداردسازی بر اساس میانگین و انحراف معیار) استاندارد شدند تا اثر تفاوت مقیاس اندازه‌گیری متغیرها حذف شود. در نهایت مقایسه و معنی‌داری تفاوت‌های مقادیر به‌دست‌آمده شاخص‌ها (SQI) با تحلیل تشخیصی ارزیابی شد. تحلیل تشخیصی به‌صورت گام‌به‌گام و بر اساس روش Wilks' Lambda انجام گرفت؛ به‌گونه‌ای که در هر گام، متغیری وارد مدل می‌شود که بیشترین کاهش را در مقدار آماره Wilks' Lambda ایجاد کند و در نتیجه بیشترین توان تفکیک بین کلاس‌ها را داشته باشد. آماره Wilks' Lambda معیاری برای سنجش میزان همپوشانی بین گروه‌ها بر اساس متغیرهای واردشده به مدل است و مقادیر کوچک‌تر ویلکز لامبدا نشان‌دهنده تفکیک بهتر کلاس‌ها و قدرت بالاتر مدل تشخیصی است. در فرآیند گام‌به‌گام، هدف اصلی انتخاب ترکیبی از شاخص‌هاست که مقدار ویلکز لامبدا را به حداقل برساند. برای بررسی معنی‌داری آماری از آزمون Chi-square استفاده شد. هرچه مقدار Chi-square بزرگ‌تر باشد، احتمال تصادفی بودن اختلاف کمتر است. به‌طور کلی در این پژوهش، عامل فرسایش‌پذیری ویلیامز به‌عنوان معیار طبقه‌بندی خاک‌ها در سه کلاس فرسایش‌پذیری استفاده شد و ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بر این مبنا صورت پذیرفت و با استفاده از تحلیل تشخیصی مقایسه شدند. تحلیل داده، ترسیم نمودار و مقایسه میانگین، با استفاده از نرم‌افزارهای Excel (2016) و SPSS (2022) انجام شد.



نتایج

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

نتایج نشان داد خاک‌های مورد پژوهش در کلاس خاک‌های با فرسایش‌پذیری زیاد تا متوسط قرار داشتند. همچنین از میان ۲۰ ویژگی فیزیکی ۱۰ ویژگی دارای اختلاف معنی‌دار بین کلاس‌های فرسایش‌پذیری خاک (کمتر از ۰/۰۳، ۰/۰۳ - ۰/۰۴ و بیشتر از ۰/۰۴) بودند ($P < 0.05$). این ویژگی‌ها شامل درصد سیلت و شن، میانگین وزنی (MWD_p) و هندسی (d_g) قطر ذرات اولیه، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها به روش الک خشک (MWD_{dry}) و تر (MWD_{wet})، میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها به روش الک تر (GMD_{wet})، شاخص پایداری ساختمان (SSI)، شاخص پایداری (SI) و عمق مؤثر نفوذ (EDI) بودند (جدول ۲). به‌طور کلی با توجه به نتایج آزمون تحلیل واریانس افزایش درصد سیلت و کاهش شن همراه با کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها و نفوذپذیری خاک می‌تواند از عوامل تشدیدکننده فرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد بررسی باشند. در گروه دارای فرسایش‌پذیری بیشتر از ۰/۰۴ $ton\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ درصد سیلت به‌طور معنی‌داری افزایش و درصد شن و میانگین وزنی قطر ذرات اولیه به‌طور قابل توجهی کاهش داشت. این نتایج در برخی پژوهش‌ها نیز تأیید شده است؛ در این راستا Parsakhoo et al. (2014) ابراز داشتند که فرسایش‌پذیری خاک با افزایش سیلت و رس و با کاهش شن و مقادیر MWD_p افزایش می‌یابد. همچنین نتایج Abiye et al. (2025) نیز نشان داده است که پایداری ساختمان خاک، سیلت، شن و نفوذپذیری با عامل فرسایش‌پذیری خاک ارتباط معنی‌داری دارند. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد عمق مؤثر نفوذ (EDI) در خاک‌های با فرسایش‌پذیری کم، بیشتر بود. نفوذپذیری بیشتر می‌تواند منجر به کاهش رواناب سطحی و در نتیجه کاهش فرسایش گردد؛ این نتیجه با منطق شناخته‌شده‌ای که خاک‌های درشت‌بافت دارای منافذ بزرگ‌تر و نفوذپذیری سریع‌تر هستند همخوانی دارد (Mesele et al. 2024). علاوه‌براین، MWD_{wet} و GMD_{wet} در خاک‌های با فرسایش‌پذیری کمتر افزایش داشت. مطالعه Wang et al. (2024) نشان داده است که شاخص‌های MWD و GMD خاک‌دانه‌ها به‌طور معنی‌داری با عامل فرسایش‌پذیری خاک همبستگی دارند و افزایش مقادیر این شاخص‌ها با کاهش این عامل همراه است.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد پژوهش

ANONA		K (ton h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)						Soil quality indicators
		0.040 <		0.030 - 0.040		0.030 >		
		(n = 10)		(n = 47)		(n = 11)		
F	P.v	mean	std.	mean	std.	mean	std.	
۱/۶۲	۰/۲۱	۱/۰۳	۰/۰۸	۱/۰۹	۰/۱۰	۱/۱۲	۰/۲۰	³ γcm BD (g
۲/۲۲	۰/۱۲	۵۹/۲۳	۴/۶۹	۵۵/۵۶	۴/۱۷	۵۴/۶۱	۹/۸۴	n (%)
۵۵/۴۷	۰/۰۰	۴۵/۱۱	۴/۷۷	۳۲/۰۸	۵/۲۲	۱۸/۹۷	۸/۰۱	Silt (%)
۲/۹۸	۰/۰۶	۲۹/۶۳	۸/۸۵	۲۴/۹۴	۸/۲۸	۲۰/۹۲	۷/۰۰	clay (%)
۲۳/۱۴	۰/۰۰	۲۵/۲۶	۱۱/۱۴	۴۲/۹۸	۱۱/۱۹	۶۰/۱۱	۱۴/۳۹	Sand (%)
۲۲/۷۲	۰/۰۰	۲۶/۱۲	۱۰/۹۲	۴۳/۳۱	۱۰/۹۶	۵۹/۹۱	۱۴/۰۳	MWD _p (mm)
۱۳/۸۶	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۱۲	d _g (mm)
۲/۴۶	۰/۰۹	۲۸/۲۷	۱۴/۶۳	۲۶/۷۶	۹/۳۵	۳۵/۱۰	۱۴/۹۹	TRF (%)
۱/۷۰	۰/۱۹	۱/۰۲	۰/۱۲	۰/۹۲	۰/۱۴	۰/۹۵	۰/۲۱	GMD _{dry} (mm)
۳/۲۳	۰/۰۴	۲/۰۸	۰/۴۵	۱/۷۸	۰/۴۸	۱/۵۶	۰/۴۱	MWD _{dry} (mm)
۵/۴۴	۰/۰۱	۰/۷۱	۰/۱۴	۰/۶۸	۰/۱۰	۰/۸۲	۰/۱۸	GMD _{wet} (mm)
۳/۷۴	۰/۰۳	۰/۹۷	۰/۴۲	۰/۷۴	۰/۳۱	۱/۰۴	۰/۵۲	MWD _{wet} (mm)
۷/۱۷	۰/۰۰	۱/۲۹	۱/۰۰	۲/۰۱	۱/۳۲	۴/۱۴	۲/۸۵	SSI (%)
۲/۵۱	۰/۰۹	۴۹/۸۵	۴/۴۰	۵۳/۶۴	۵/۳۶	۵۶/۳۴	۱۱/۸۱	DC (%)
۵/۰۱	۰/۰۱	۰/۴۸	۰/۲۱	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۶۵	۰/۲۵	SI (mm)
۲/۵۶	۰/۰۹	۱/۵۲	۰/۳۱	۱/۲۶	۰/۳۲	۱/۳۰	۰/۴۲	OAS (mm)
۱/۹۱	۰/۱۶	۳۳/۸۹	۲۶/۶۸	۳۳/۷۱	۲۳/۲۵	۴۸/۰۹	۳۱/۲۹	CI (cm)
۱/۰۵	۰/۳۶	۱۵/۹۳	۱۱/۵۴	۱۷/۱۶	۱۱/۸۰	۱۹/۵۳	۶/۹۸	h ⁻¹) FIR (cm
۱/۵۸	۰/۲۱	۳۳/۹۹	۲۶/۶۸	۳۲/۷۳	۲۳/۹۱	۴۷/۰۳	۳۴/۶۳	MIR (cm h ⁻¹)
۵/۵۹	۰/۰۱	۱۷۰/۳۰	۱۳۳/۷۵	۱۶۲/۲۴	۹۵/۸۷	۳۲۶/۹۴	۲۱۵/۲۵	EDI (cm)

Bulk Density, n: Total Porosity, TRF: Total Rock Fragments, MWD_p : Mean Weight Diameter of primary particles, d_g : Geometric Mean Diameter of primary particles, GMD_{dry} : Geometric Mean Diameter Dry, MWD_{dry} : Mean Weight Diameter Dry, GMD_{wet} : Geometric Mean Diameter Wet, MWD_{wet} : Mean Weight Diameter Wet, SSI: Soil Structure Stability Index, DC: Degree of Compactness, SI: Structure Index, OAS: Overall Aggregate Stability, CI: Cumulative Infiltration, FIR: Final Infiltration Rate, MIR: Mean Infiltration Rate, EID: Effective Infiltration Depth.

ماتریس همبستگی ویژگی‌های فیزیکی

نتایج ماتریس همبستگی نشان داد (جدول ۳) از اجزای اصلی ذرات اولیه، بخش شن با سیلت همبستگی منفی و بسیار قوی ($r = -0.87$) داشت که بیانگر ماهیت متقابل ترکیب بافتی در نمونه‌ها بوده و می‌تواند پیامدهای مستقیم بر رفتار فرسایش‌پذیری خاک داشته باشد (Bartès & Roose, 2002). میانگین وزنی قطر ذرات اولیه (MWD_p) الگوی مشابهی با شن نشان داد که بیانگر نقش مستقیم درصد ذرات درشت در میانگین وزنی قطر ذرات اولیه است (Parsakhoo et al., 2014). میانگین هندسی قطر ذرات اولیه (d_g) نیز بیشترین همبستگی مثبت با شن ($r = 0.86$) و مثبت با سیلت ($r = -0.71$) داشت. به‌طور کلی خاک‌های ریزدانه‌تر اغلب ناپایدارتر بوده و در رخداد بارش استعداد بیشتری برای فروپاشی دارند (Cen et al., 2024). در میان شاخص‌های پایداری ساختمان خاک، MWD_{dry} با OAS ($r = 0.84$) همبستگی مثبت داشت که اهمیت مقاومت خاک‌دانه‌ها در شرایط خشک برای حفظ انسجام ساختاری را نشان می‌دهد. همچنین GMD_{wet} و MWD_{wet} با یکدیگر همبستگی بسیار بالا ($r = 0.86$) داشتند. از سوی دیگر، عمق مؤثر نفوذ (EDI) همبستگی ضعیف تا متوسطی با سایر ویژگی‌ها داشت که بیانگر تأثیر عوامل ساختاری دیگر مانند تراکم، ریزمنافذ و پیوستگی حفرات بر نفوذپذیری است (Nciizah et al., 2014).

جدول ۳. ماتریس همبستگی ویژگی‌های فیزیکی مجموعه کامل داده‌ها (TDS)

EDI	OAS	SSI	MWD_{wet}	GMD_{wet}	MWD_{dry}	d_g	MWD_p	Sand	Silt	Indicator
									۱/۰۰	Silt
								۱/۰۰	** -۰/۸۷	Sand
							۱/۰۰	۱/۰۰	** -۰/۸۷	MWD_p
						۱/۰۰	** -۰/۸۶	** -۰/۸۶	** -۰/۷۱	d_g
					۱/۰۰	-۰/۵۳	** -۰/۵۲	** -۰/۵۲	** -۰/۴۲	MWD_{dry}
				۱/۰۰	-۰/۰۸	-۰/۰۵	-۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۳	GMD_{wet}
			۱/۰۰	** -۰/۸۶	-۰/۲۵	-۰/۲۱	-۰/۲۴	-۰/۲۴	-۰/۲۳	MWD_{wet}
		۱/۰۰	** -۰/۵۳	** -۰/۵۷	-۰/۱۱	-۰/۰۸	-۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۱۰	SSI
	۱/۰۰	** -۰/۳۸	** -۰/۷۳	** -۰/۵۳	** -۰/۸۴	** -۰/۴۹	** -۰/۵۰	** -۰/۵۰	** -۰/۴۲	OAS
۱/۰۰	-۰/۰۶	** -۰/۳۱	-۰/۲۳	** -۰/۳۱	-۰/۱۲	** -۰/۳۲	** -۰/۳۲	** -۰/۳۲	** -۰/۳۳	EDI

MWD_p : Mean Weight Diameter of primary particles, d_g : Geometric Mean Diameter of primary particles, MWD_{dry} : Mean Weight Diameter Dry, GMD_{wet} : Geometric Mean Diameter Wet, MWD_{wet} : Mean Weight Diameter Wet, SSI: Soil Structure Stability Index, OAS: Overall Aggregate Stability, EID: Effective Infiltration Depth

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

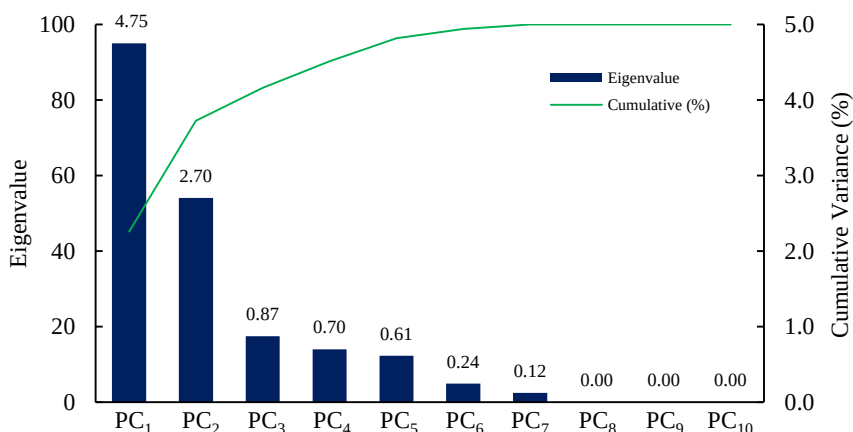
نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی مهم‌ترین شناسه‌های فیزیکی مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک و کاهش ابعاد داده‌ها روی ۱۰ ویژگی فیزیکی نشان داد، با توجه به مقدار ویژه (Eigenvalue) و درصد واریانس تبیینی هر مؤلفه، سه مؤلفه اول در منحنی اسکری پلات (شکل ۳) با ایجاد نقطه شکست، مجموعاً ۸۳ درصد از کل واریانس داده‌ها را توضیح دادند (مؤلفه اول ۴۷/۵۱ درصد، مؤلفه دوم ۲۷/۰۱ درصد و مؤلفه سوم ۸/۷۳ درصد). بنابراین، سه مؤلفه نخست به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد و استخراج شاخص‌های کلیدی فرسایش‌پذیری خاک مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۴). در مؤلفه اول (PC_1) شناسه‌های مرتبط با توزیع اندازه ذرات اولیه بیشترین بار عاملی (Eigenvector) را داشتند. شن، میانگین وزنی (MWD_p) و هندسی (d_g) قطر ذرات اولیه و سیلت به ترتیب بار عاملی ۰/۹۶، ۰/۹۶، ۰/۹۲ و ۰/۹۰ نشان دادند. اگرچه چهار شناسه مذکور بیشترین سهم را در تبیین واریانس این مؤلفه داشتند، به‌علت همبستگی بالا ($r > 0.7$) بین این شناسه‌ها، تنها شن به‌عنوان نماینده مؤثر این مؤلفه انتخاب شد (جدول ۳). در مؤلفه دوم، میانگین هندسی (GMD_{wet}) و وزنی (MWD_{wet}) خاک‌دانه‌ها با روش الگوتر دارای بالاترین بار عاملی بودند (به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۱) و هر دو واریانس بالایی از این مؤلفه را توضیح دادند. این مؤلفه بیشتر بیانگر پایداری ساختمان خاک تحت شرایط مرطوب خاک‌دانه‌ها در برابر فروپاشی در اثر بارش یا آبیاری است. با توجه به همبستگی بسیار بالا میان این دو ویژگی ($r > 0.7$)، میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در شرایط تر (GMD_{wet}) به‌عنوان نماینده مؤلفه دوم حفظ شد. مؤلفه سوم نیز عمده‌تاً توسط میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در شرایط خشک (MWD_{dry}) با بار عاملی بسیار بالا (۰/۹۳) تبیین شد. این مؤلفه بیانگر متوسط قطر خاک‌دانه‌ها در شرایط خشک است. سایر ویژگی‌ها در این مؤلفه بار عاملی کمتر از ۰/۷۲ داشتند و اثر قابل توجهی نشان ندادند. بنابراین شاخص اصلی مؤلفه سوم بیشتر متوسط قطر خاک‌دانه‌ها در شرایط خشک را بازتاب می‌دهد.



جدول ۴. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

PC ₁₀	PC ₉	PC ₈	PC ₇	PC ₆	PC ₅	PC ₄	PC ₃	PC ₂	PC ₁	PCs parameters
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۸۷	۲/۷۰	۴/۷۵	Eigenvalue
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۲۲	۲/۴۳	۶/۱۲	۶/۹۹	۸/۷۳	۲۷/۰۱	۴۷/۵۱	% of Variance
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹	۹۶	۹۰	۸۳	۷۵	۴۵	Cumulative (%)
Communalities						Eigenvectors			Indicators	
۰/۹۸						-۰/۲۴	-۰/۰۴	-۰/۹۶	Sand	
۰/۹۷						-۰/۲۴	-۰/۰۴	-۰/۹۶	MWD _p	
۰/۹۲						۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۹۲	dg	
۰/۸۲						۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۹۰	Silt	
۰/۴۱						۰/۰۷	۰/۴۴	-۰/۴۵	EDI	
۰/۸۹						-۰/۰۴	۰/۹۴	۰/۰۳	GMD _{wet}	
۰/۸۹						۰/۱۲	۰/۹۱	۰/۲۲	MWD _{wet} (mm)	
۰/۵۱						۰/۲۳	۰/۶۶	-۰/۱۴	SSI	
۰/۹۸						۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۳۳	MWD _{dry}	
۰/۹۶						۰/۷۲	۰/۵۶	۰/۳۵	OAS	

MWD_p: Mean Weight Diameter of primary particles, dg: Geometric Mean Diameter of primary particles, EID: Effective Infiltration Depth, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter Wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter Wet, SSI: Soil Structure Stability Index, MWD_{dry}: Mean Weight Diameter Dry, OAS: Overall Aggregate Stability.



شکل ۳. تغییرات مقادیر ویژه مؤلفه‌های اصلی

اهمیت ویژگی‌های فیزیکی در تبیین کیفیت خاک بر مبنای فرسایش‌پذیری

نتایج توابع نمره‌دهی و تعیین وزن هر ویژگی در تبیین کیفیت فیزیکی خاک برای شاخص فرسایش‌پذیری در TDS نشان داد بخش شن، سیلت، میانگین وزنی (MWD_p) و هندسی (dg) قطر ذرات اولیه، میانگین هندسی (GMD_{wet}) و وزنی (MWD_{wet}) قطر خاک‌دانه‌ها با روش الک تر، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها با روش الک خشک (MWD_{dry}) و پایداری عمومی خاک‌دانه‌ها (OAS) در بازه ۰/۱۱ الی ۰/۱۲ متغیر بودند (جدول ۵). شن، میانگین وزنی قطر ذرات اولیه (MWD_p) و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها با روش الک خشک (MWD_{dry}) دارای وزنی برابر ۰/۱۲ بودند. افزایش سهم شن می‌تواند سبب افزایش تخلخل درشت، زهکشی مؤثر، نفوذپذیری و کاهش تراکم شده و در نهایت شرایط فیزیکی مناسب‌تری را برای عملکرد ریشه و جریان آب فراهم کند (Moratelli et al., 2023). این نتیجه بیان می‌کند که توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به‌عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده رفتار فیزیکی خاک‌های منطقه مورد پژوهش برای شاخص فرسایش‌پذیری خاک است. درمقابل درصد سیلت که در گروه هرچه کمتر بهتر قرار گرفته بود؛ دارای وزنی برابر با ۰/۱۰ بود که بیان‌گر اثر نامطلوب افزایش سیلت بر کیفیت فیزیکی خاک‌ها است. مقدار بیشتر سیلت اغلب با ساختار ناپایدار، اندوده سطحی، کاهش تهویه و نفوذپذیری خاک همراه است (Asadi et al., 2023). نتایج توابع نمره‌دهی و تعیین وزن هر ویژگی در تبیین کیفیت فیزیکی خاک برای شاخص فرسایش‌پذیری در

MDS نیز نشان داد بخش شن با وزن ۰/۵۷ بیشترین سهم را در تبیین کیفیت فیزیکی خاک‌ها نشان داشت. میانگین هندسی (GMD_{wet}) قطر خاک‌دانه‌ها با روش الک تر و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها با روش الک خشک (MWD_{dry}) به ترتیب دارای وزنی برابر ۰/۳۲ و ۰/۱۰ بودند. نتایج حاکی از این است که در مجموعه حداقل داده‌ها نیز توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به عنوان مهم‌ترین عامل تعیین کننده در تبیین کیفیت فیزیکی خاک‌ها برای شاخص فرسایش پذیری است.

جدول ۵. توابع نمره‌دهی پارامترهای معادلات خطی و غیرخطی و وزن‌های محاسبه شده برای مجموعه کامل داده‌ها (TDS) و مجموعه حداقل داده‌ها (MDS)

Weight - MDS	Weight - TDS	Non-linear		Linear		Scoring curve	Indicator
		Slope (b)	Mean (x_0)	h	l		
۰/۵۷	۰/۱۲	-۲/۵	۴۳/۱۵	۸۲/۷۵	۵/۹۰	More is better	Sand
	۰/۱۲	-۲/۵	۴۳/۴۷	۸۲/۰۷	۷/۱۶	More is better	MWD_p
	۰/۱۱	-۲/۵	۰/۰۸	۰/۴۴	۰/۰۱	More is better	d_g
	۰/۱۰	۲/۵	۳۱/۸۷	۵۱/۲۸	۶/۴۴	Less is better	Silt
	۰/۰۵	-۲/۵	۱۹۰/۰۷	۸۷۱/۸۷	۲۶/۷۸	More is better	EDI
۰/۳۲	۰/۱۱	-۲/۵	۰/۷۱	۱/۰۹	۰/۴۱	More is better	GMD_{wet}
	۰/۱۱	-۲/۵	۰/۸۲	۱/۹۸	۰/۰۹	More is better	MWD_{wet}
	۰/۰۶	-۲/۵	۲/۲۵	۹/۱۳	۰/۰۲	More is better	SSI
۰/۱۰	۰/۱۲	-۲/۵	۱/۷۹	۲/۹۰	۰/۶۷	More is better	MWD_{dry}
	۰/۱۱	-۲/۵	۱/۳۰	۲/۱۲	۰/۶۳	More is better	OAS

MWD_p : Mean Weight Diameter of primary particles, d_g : Geometric Mean Diameter of primary particles, EID: Effective Infiltration Depth, GMD_{wet} : Geometric Mean Diameter Wet, MWD_{wet} : Mean Weight Diameter Wet, SSI: Soil Structure Stability Index, MWD_{dry} : Mean Weight Diameter Dry, OAS: Overall Aggregate Stability.

شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

نتایج حاصل از محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی (SQI) برای فرسایش پذیری خاک با استفاده از دو رویکرد مجموعه داده کامل (TDS) و مجموعه داده حداقل (MDS) با دو روش نمره‌دهی خطی و غیرخطی در جدول ۶ نشان داده شده است. کمترین مقدار میانگین شاخص‌های کیفیت خاک‌ها مربوط به روش ساده در مجموعه کامل داده‌ها با نمره‌دهی خطی بود (SQI-1) و بیشترین مقدار مربوط به روش وزنی و ساده در مجموعه حداقل داده‌ها با نمره‌دهی غیرخطی بود (SQI-7-SQI-8). دامنه تغییرات (حداقل و حداکثر) شاخص‌ها برای نمونه‌های مورد بررسی نسبتاً گسترده بود؛ به طوری که کمترین مقدار ثبت شده ۰/۱۴ در SQI-6 و بیشترین مقدار ۰/۷۵ نیز در همین شاخص مشاهده شد که حاکی از حساسیت بالاتر این شاخص به تغییرات شرایط خاک است. مقادیر انحراف معیار بین ۰/۰۷ تا ۰/۱۲ تغییر کرد که نشان دهنده پراکنش متوسط داده‌ها و وجود ناهمگنی مکانی یا مدیریتی در کیفیت خاک است.

جدول ۶. نتایج شاخص‌های کیفیت خاک (SQI) برای کلاس‌های مختلف فرسایش پذیری خاک‌ها

SD	Min	Max	Mean	Variable
۰/۱۰	-۰/۳۳	۰/۶۳	۰/۳۸	SQI - 1
۰/۱۰	۰/۲۴	۰/۶۶	۰/۴۰	SQI - 2
۰/۱۱	-۰/۲۹	۰/۷۱	۰/۴۶	SQI - 3
۰/۱۰	-۰/۳۰	۰/۷۰	۰/۴۷	SQI - 4
۰/۱۰	-۰/۲۵	۰/۷۳	۰/۴۷	SQI - 5
۰/۱۲	-۰/۱۴	۰/۷۵	۰/۴۷	SQI - 6
۰/۰۷	-۰/۲۹	۰/۶۶	۰/۴۸	SQI - 7
۰/۱۱	-۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۴۸	SQI - 8

SQI: Soil Quality Index

SQL-1: روش ساده با نمره‌دهی خطی (TDS)، SQL-2: روش وزنی با نمره‌دهی خطی (TDS)، SQL-3: روش ساده با نمره‌دهی غیرخطی (TDS)، SQL-4: روش وزنی با نمره‌دهی غیرخطی (TDS)، SQL-5: روش ساده با نمره‌دهی خطی (MDS)، SQL-6: روش وزنی با نمره‌دهی خطی (MDS)، SQL-7: روش ساده با نمره‌دهی غیرخطی (MDS)، SQL-8: روش وزنی با نمره‌دهی غیرخطی (MDS).



تحلیل تشخیصی شاخص‌های کیفیت خاک

بر اساس جدول ۷، نتایج تحلیل تشخیصی نشان داد که شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک توان بالایی در تفکیک کلاس‌های فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد مطالعه دارند. تابع تشخیصی اول با مقدار ویژه $2/73$ قادر است $92/48$ درصد از کل واریانس داده‌ها را تبیین کند که نشان‌دهنده نقش غالب این تابع در جداسازی گروه‌هاست. مقدار کم Wilks' Lambda ($0/22$) همراه با مقدار بالای Chi-square ($97/17$) و سطح معنی‌داری بالا ($P < 0.000$) بیانگر قدرت تفکیک بسیار قوی و معنی‌دار این تابع است. در مقابل، تابع دوم تنها $7/52$ درصد از واریانس را توضیح می‌دهد، باین‌حال مقدار Wilks' Lambda برابر $0/82$ و معنی‌داری آماری آن ($P < 0.00$) نشان می‌دهد که این تابع نیز، هرچند با قدرت کمتر، در تمایز گروه‌ها نقش دارد. نتایج حاصل از تحلیل تشخیص نشان داد که بهترین شاخص کیفیت فیزیکی برای فرسایش‌پذیری خاک مربوط به نمره‌دهی خطی با روش وزنی در مجموعه کامل داده‌ها (TDS) بود؛ به‌طوری‌که این روش بالاترین مقدار ضریب تفکیک را به خود اختصاص داد و توانایی بیشتری در تفکیک کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری خاک نشان داد. این برتری بیانگر آن است که استفاده هم‌زمان از مجموعه کامل داده‌ها و اعمال وزن‌های مبتنی بر اهمیت نسبی هر شناسه، موجب افزایش تفکیک‌پذیری شاخص کیفیت فیزیکی خاک در بازتاب حساسیت خاک نسبت به فرسایش می‌شود. پس از آن، نمره‌دهی خطی با روش ساده در مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) در رتبه دوم قرار گرفت که نشان می‌دهد حتی با کاهش تعداد شناسه‌ها، در صورت انتخاب شناسه‌های کلیدی و اثرگذار، می‌توان به قدرت تفکیک قابل قبولی در ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک دست یافت. در نهایت، روش وزنی با نمره‌دهی غیرخطی در مجموعه کامل داده‌ها (TDS) قرار گرفت که اگرچه نسبت به سایر شاخص‌ها قدرت تفکیک کمتری داشت، اما همچنان عملکرد مناسبی در شناسایی تفاوت‌های فرسایش‌پذیری خاک‌ها از خود نشان داد. بررسی ضرایب تفکیک نشان می‌دهد که در تابع اول، شاخص SQI-2 با بیشترین ضریب تفکیک ($33/04$) مهم‌ترین شاخص در تفکیک گروه‌های فرسایش‌پذیری خاک است، درحالی‌که SQI-5 با ضریب تفکیک بالا ($-22/99$) در رتبه دوم و SQI-4 نیز نقش ثانویه‌تری ایفا می‌کند. این نتایج حاکی از آن است که تغییرات مرتبط با SQI-2 بیشترین سهم را در تمایز وضعیت فیزیکی خاک‌ها از نظر فرسایش‌پذیری خاک دارند. در تابع دوم نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که SQI-2 با ضریب تفکیک بالا ($-44/78$) و پس از آن SQI-4 ($27/16$) و SQI-5 ($24/29$) قرار می‌گیرد.

جدول ۷. نتایج تحلیل تشخیصی در ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی برای فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد پژوهش

تابع	مقدار ویژه	واریانس تبیینی (%)	Wilks' Lambda	square - Chi	Value - P
۱	$2/73$	$92/48$	$0/22$	$97/17$	$0/000$
۲	$0/22$	$7/52$	$0/82$	$12/85$	$0/00$
تابع	شاخص کیفیت فیزیکی خاک	ضریب تفکیک			
۱	SQL-2	$33/04$			
	SQL-4	$4/62$			
	SQL-5	$-22/99$			
۲	SQL-2	$-44/78$			
	SQL-4	$27/16$			
	SQL-5	$24/29$			

SQL: Soil Quality Index

SQL-2: روش وزنی با نمره‌دهی خطی (TDS)، SQL-4: روش وزنی با نمره‌دهی غیرخطی (TDS)، SQL-5: روش ساده با نمره‌دهی خطی (MDS).

بحث

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که در مقیاس مجموعه داده کامل (TDS) توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، به‌ویژه درصد شن و متوسط اندازه خاک‌دانه‌ها در شرایط خشک (MWD_{dry}) و در مقیاس مجموعه حداقل (MDS) نیز درصد شن و پس از آن پایداری خاک‌دانه‌ها در شرایط تر (GMD_{wet}) مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای شاخص فرسایش‌پذیری هستند. وزن بالای این شاخص‌ها

در هر دو مجموعه داده کامل (TDS) و حداقل (MDS) بیانگر نقش تعیین‌کننده آن‌ها در کنترل حساسیت خاک به فرسایش است. توزیع اندازه ذرات اولیه، ظرفیت ذاتی خاک برای مقاومت در برابر جداسازی ذرات را تعیین می‌کند، در حالی که پایداری خاک‌دانه‌ها بیانگر توانایی ساختمان خاک در حفظ یکپارچگی خود در برابر نیروهای مخرب ناشی از بارندگی و رواناب است (Peng et al., 2024). افزایش میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌های پایدار، مقاومت خاک را در برابر ضربه قطرات باران افزایش داده، از فروپاشی ساختمان خاک جلوگیری کرده و تولید ذرات ریز قابل انتقال را کاهش می‌دهد (Peng et al., 2024). درمقابل، ناپایداری خاک‌دانه‌ها موجب فروپاشی ساختمان خاک، افزایش سهم ذرات ریز معلق و در نتیجه تشدید فرآیند فرسایش می‌شود (Wang et al., 2024). همچنین، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها می‌تواند اثر نامطلوب توزیع نامناسب اندازه ذرات اولیه بر فرسایش‌پذیری را تا حد زیادی تعدیل کند؛ به‌گونه‌ای که حتی خاک‌های با بافت مستعد فرسایش، در صورت برخورداری از خاک‌دانه‌های پایدار، مقاومت بیشتری در برابر فرسایش از خود نشان می‌دهند (Dai et al., 2024). شواهد علمی نیز نشان می‌دهد در کنار توزیع اندازه ذرات اولیه که پتانسیل ذاتی خاک برای فرسایش را تعیین می‌کند، پایداری خاک‌دانه‌ها نیز در بروز فرسایش واقعی خاک تحت شرایط بارندگی و رواناب بسیار حائز اهمیت بوده و ارزیابی همزمان این دو شناسه، درک دقیق‌تری از فرآیندهای فرسایش خاک فراهم می‌سازد (Peng et al., 2024).

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد که توزیع اندازه ذرات اولیه و پایداری خاک‌دانه‌ها را مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده فرسایش‌پذیری خاک معرفی کرده‌اند (Abiye & Dengiz, 2025; Zhu et al., 2022). همچنین Renard, (1997) بیان کرد که خاک‌های دارای درصد سیلت بیشتر، به دلیل چسبندگی کمتر بین ذرات و قابلیت جداسازی بالاتر، معمولاً فرسایش‌پذیری بیشتری نسبت به خاک‌های دارای ذرات درشت یا ساختمان پایدار دارند. با این حال، نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد که اندازه بزرگ خاک‌دانه‌ها به‌تنهایی تضمین‌کننده بهبود کیفیت فیزیکی خاک نیست، بلکه پایداری آن‌ها در برابر ترشوندگی سریع، ضربه قطرات باران و تنش‌های مکانیکی عامل اصلی در کاهش فرسایش‌پذیری است (Le Bissonnais, 1996; Six et al., 2002). در خاک‌های نیمه‌خشک با ماده آلی پایین، خاک‌دانه‌های درشت اما ناپایدار به سرعت متلاشی شده و با آزادسازی ذرات ریز، موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش فرسایش‌پذیری می‌شوند (Bronick & Lal, 2005; Bryan, 2000).

در این پژوهش، عامل فرسایش‌پذیری ویلیامز به‌عنوان متغیر مبنای طبقه‌بندی خاک‌ها به کار گرفته شد و هدف، ارزیابی عملکرد شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در تبیین تفاوت بین کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری بود. نتایج تحلیل تشخیصی نیز نشان داد که شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، به‌ویژه SQI-2 و SQI-5، توانایی بالایی در تفکیک کلاس‌های مختلف فرسایش‌پذیری دارند. برتری شاخص SQI-2 بیانگر آن است که استفاده از روش وزن‌دهی خطی، اطلاعات حاصل از ویژگی‌های کلیدی خاک را بهتر از سایر روش‌ها تلفیق کرده و می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک و پایش تخریب آن باشد. این یافته با نتایج Andrews et al., (2002) و Askari & Holden, (2014) و همچنین شمخانی و همکاران (۱۴۰۴) همخوانی دارد که گزارش کردند استفاده از توابع غیرخطی لزوماً موجب بهبود دقت ارزیابی کیفیت خاک نمی‌شود و در بسیاری از شرایط، شاخص‌های مبتنی بر توابع خطی عملکرد مناسب‌تری دارند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص‌های مرتبط با توزیع اندازه ذرات اولیه و پایداری ساختمان خاک، مناسب‌ترین شناسه‌ها برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای فرسایش‌پذیری هستند. بنابراین، مدیریت‌هایی که موجب حفظ ساختمان خاک، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و بهبود توزیع منافذ شوند، می‌توانند نقش مؤثری در کاهش فرسایش‌پذیری و ارتقای کیفیت فیزیکی خاک‌های مناطق نیمه‌خشک ایفا کنند. همچنین به‌طور کلی عامل فرسایش‌پذیری مبنایی برای مقایسه عملکرد شاخص‌های کیفیت فیزیکی و شناسایی مناسب‌ترین شناسه‌ها و روش‌های ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک را فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که برخی از خاک‌های منطقه خشک زنجان عمدتاً در کلاس‌های فرسایش‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارند و نسبت به فرآیندهای فرسایشی حساس هستند. از میان ۲۰ ویژگی فیزیکی اندازه‌گیری شده، ۱۰ ویژگی اختلاف معنی‌داری بین کلاس‌های فرسایش‌پذیری نشان دادند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی سه مؤلفه اصلی را شناسایی کرد که ۸۳ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین نمود که عمدتاً به شناسه‌های توزیع اندازه ذرات اولیه و پایداری خاک‌دانه‌ها مرتبط بودند. این شناسه‌ها مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین‌کننده کیفیت فیزیکی خاک در ارتباط با فرسایش‌پذیری بودند. نتایج شاخص کیفیت فیزیکی خاک (SQI) نیز نشان داد که با افزایش فرسایش‌پذیری، کیفیت فیزیکی خاک کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از روش وزنی با نمره‌دهی خطی به‌ویژه در قالب شاخص‌های وزنی مبتنی بر TDS،



بالاترین قدرت تفکیک و کارایی را در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌ها بر مبنای فرسایش‌پذیری و با استفاده از روش تحلیل تشخیصی نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب هدفمند شناسه‌های کلیدی و تخصیص مناسب وزن‌ها می‌تواند ابزار مؤثری برای پایش کیفیت خاک و طراحی راهبردهای مدیریتی در جهت کاهش فرسایش خاک باشد. روش ساده با نمره‌دهی خطی در مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) در رتبه دوم قرار گرفت که نشان‌دهنده کارایی مناسب این روش حتی با تعداد محدود شناسه‌ها است. در نهایت، روش وزنی با نمره‌دهی غیرخطی در مجموعه کامل داده‌ها (TDS) قرار گرفت که با وجود قدرت تفکیک کمتر، همچنان توانایی قابل قبولی در تمایز فرسایش‌پذیری خاک‌ها داشت. نتایج این پژوهش حاکی از این بود که شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک (SQI) از توان بالایی در تفکیک کلاس‌های فرسایش‌پذیری خاک برخوردارند و تغییرات آن‌ها به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر فرسایش‌پذیری خاک قرار می‌گیرد. همچنین شناسه‌های PSD و پایداری ساختمان خاک می‌تواند ابزار مؤثر و مفیدی برای پایش کیفیت فیزیکی خاک و مدیریت اراضی حساس به فرسایش در قالب شاخص‌های کیفیت فراهم آورد.

پیشنهادها

با توجه به نتایج و محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی اثر نوع کاربری اراضی بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی بر مبنای فرسایش‌پذیری خاک با داده‌های سنجش‌ازدور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای پهنه‌بندی مکانی فرسایش‌پذیری خاک انجام شود. همچنین برای ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک، علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی، ویژگی‌های شیمیایی مؤثر بر فرسایش‌پذیری نیز مورد بررسی قرار گیرد. بدین ترتیب شاخص‌های تولید شده می‌تواند موجب بهبود درک روابط بین ویژگی‌های خاک و فرسایش‌پذیری شود. شناسایی حدود آستانه‌ای شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک‌ها بر مبنای فرسایش‌پذیری می‌تواند مبنای تعیین اولویت‌های مدیریتی و حفاظتی قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با پشتیبانی تجهیزاتی گروه علوم و مهندسی خاک و حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه زنجان انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه زنجان دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها تهیه گزارش پژوهش تحلیل داده‌ها نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

این مقاله حاصل پژوهش صحرایی و نگارش مستقیم نویسندگان مقاله است و از هوش مصنوعی در هیچ مرحله‌ای بهره گرفته نشده است. نویسندگان مسئولیت کامل محتوای مقاله را بر عهده می‌گیرند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه زنجان به خاطر پشتیبانی مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش در شورای گروه خاکشناسی و شورای دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان مطابق مصوبه شورای دانشکده دریافت کرده است. نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- شمخانی، حسین؛ عسکری، محمدصادق؛ واعظی، علی رضا و علمداری، پرپسا (۱۴۰۴). ارزیابی کمی کیفیت خاک تحت سامانه‌های مدیریتی مرتع در استان زنجان. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۶ (۱۱)، ۳۰۸۶ - ۳۰۶۱.
- یاوری، مرتضی؛ محمدی، محمدحسین و شهبازی، کریم (۱۳۹۹). مقایسه برخی روش‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و ارائه زمان‌های مناسب برای روش چهار قرائت تعیین بافت خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران* ۱۲ (۵۱)، ۳۰۱۵ - ۲۹۹۹.
- یاوری، مرتضی؛ واعظی، علی‌رضا و عسکری، محمدصادق (۱۴۰۴). بررسی نقش ویژگی‌های فیزیکی خاک بر شاخص‌های نفوذ آب در خاک (مطالعه موردی: استان زنجان). *پژوهش‌های خاک* ۳۹ (۴)، ۴۳۶ - ۴۲۱.

REFERENCES

- Abiye, W., & Dengiz, O. (2025). Digital mapping of soil erodibility factor in response to land use change using machine learning models. *Environmental Systems Research*, 14(1), 14.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90(1), 25-45.
- Asadi Fard, Z., Ahmadi, A., Jafarzadeh, A.A., Karami, A., & Alavikia S. (2023). Determining the Effective Factors on Soil Susceptibility to Surface Sealing Using Multivariate Statistical Analysis, 13 (3): 112-130.
- Askari, M.S., & Holden, N.M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230, 131-142.
- Barthès, B., & Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47(2), 133-149.
- Bastida, F., Moreno, J.L., Hernández, T., & García, C. (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(12), 3463-3473.
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Bulk density 1. Methods of soil analysis: part 1-physical and mineralogical methods, pp.363-375.
- Boardman, J., & Poesen, J. (Eds.). (2007). Soil erosion in Europe. John Wiley & Sons.
- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2017). The Nature and Properties of Soils, 15th Edn (eBook).
- Brejda, J.J., Karlen, D.L., Smith, J. L., & Allan, D. L. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2125-2135.
- Bronick, C.J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Bryan, R.B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3-4), 385-415.
- Bünemann, Else K., Giulia Bongiorno, Zhanguo Bai, Rachel E. Creamer, Gerlinde De Deyn, Ron De Goede, Luuk Fleskens et al. "Soil quality—A critical review." *Soil biology and biochemistry* 120 (2018): 105-125.
- Costantini, E. A., & Priori, S. (2022). Soil quality and health key indicators.
- Culley J.L. Density and compressibility in Soil sampling and methods of analysis (ed. Carter, MR) 529–549.
- Dai, W., Feng, G., Huang, Y., Tewolde, H., Shankle, M. W., & Jenkins, J. N. (2024). Soil aggregate stability and erosion resistance in response to integration of cover crops and poultry litter in a no-till rainfed soybean cropping system. *Soil and Tillage Research*, 244, 106245.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable



- environment, 35, 1-21.
- Karkaj, Sh, 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(3), 648-658.
- Lal, R. (1997). Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 352(1356), 997-1010.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation and development*, 12(6), 519-539.
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and energy security*, 5(4), 212-222.
- Le Bissonnais, Y.L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*, 47(4), 425-437.
- Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., & Patra, A. K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1), 419-435.
- Mesele, S.A. (2024). Changes in soil susceptibility to erosion under tillage and soil fertility management practices.
- Moratelli, F.A., Alves, M.A.B., Borella, D.R., Kraeski, A., Almeida, F.T.D., Zolin, C.A., & Souza, A.P.D. (2023). Effects of Land Use on Soil Physical-Hydric Attributes in Two Watersheds in the Southern Amazon, Brazil. *Soil Systems*, 7(4), 103.
- Morgan, R.P.C. (2009). Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
- Nciizah, A.D. (2014). Aggregate stability, crust formation, steady state infiltration and mode of seedling emergence in soils with various texture and mineralogy (Doctoral dissertation, University of Fort Hare).
- Nosrati, K, and Adrian L. Collins. "A soil quality index for evaluation of degradation under land use and soil erosion categories in a small mountainous catchment, Iran." *Journal of Mountain Science* 16, no. 11 (2019): 2577-2590.
- Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis*, part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2.
- Peng, J., Wang, J., Yang, Q., Long, L., Li, H., Guo, Z., & Cai, C. (2024). Spatial variation in soil aggregate stability and erodibility at different slope positions in four hilly regions of northeast China. *Catena*, 235, 107660.
- Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth surface processes and landforms*, 43(1), 64-84.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91-133.
- Pritom Pal and Parijat Bhattacharya (2024). Soil physical properties: A crucial component of ecosystem health and productivity. *Int. J. Agric. Nutr*, 6(2):75-77.
- 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.
- Renard, K.G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Ritz, K., Black, H.I., Campbell, C.D., Harris, J.A., & Wood, C. (2009). Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. *Ecological Indicators*, 9(6), 1212-1221.
- Shamkhani, H., Askari, M.S., Vaezi, A.R. & Alamdari, P. (2025). Quantitative Assessment of Soil Quality Under Rangeland Management Systems in Zanjan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(11), 3061-3086. (inPersian)
- Sinha, S., Masto, R. E., Ram, L.C., Selvi, V.A., Srivastava, N.K., Tripathi, R.C., & George, J. (2009). Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(9), 1824-1832.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S., de Moraes Sa, J.C., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22(7-8), 755-775.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil asidity. p. 475- 490. In: D.L. Sparks et al. (eds.). *Method of Soil Analysis. Part 3. 3rd ed. Chemical and Microbiological Properties*. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Vaezi, A.R., Eslami, S.F., & Keesstra, S. (2018). Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls. *Catena*, 167, 385-398.
- Walkley, A. & Black, I.A. (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.

- Wang, G., Zhang, Z., Henderson, M., Chen, M., Dou, Z., Zhou, W., & Liu, B. (2024). Effects of Terracing on Soil Aggregate Stability and Erodibility in Sloped Farmland in Black Soil (Mollisols) Region of China. *Agriculture*, 14(9), 1534.
- Williams, J.R. (1990). The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 329(1255), 421-428.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wu, J., Yang, G., Ma, Y., Guo, X., Lu, N., Chen, Z., & Du, H. (2024). Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics and soil erodibility at gully head in Loess hilly and gully region. *Scientific Reports*, 14(1), 31149.
- Yavari, M., Mohammadi, M. H., & Shahbazi, K. (2021). Comparison of some methods for measuring primary soil particle size distribution and introducing appropriate times for the four-reading method for determining soil texture. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 2999-3015. (inPersian)
- Yavari, M. , Vaezi, A. and Askari, M. (2026). Investigating the Role of Soil Physical Properties on Water Infiltration Indices (Case Study: Zanjan Province). *Iranian Journal of Soil Research*, 39(4), 421-436. (inPersian)
- Zhang, C., Xue, S., Liu, G. B., & Song, Z.L. (2011). A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China. *Plant and Soil*, 347(1), 163-178.
- Zhu, X., Liu, W., Yuan, X., Chen, C., Zhu, K., Zhang, W., & Yang, B. (2022). Aggregate stability and size distribution regulate rainsplash erosion: Evidence from a humid tropical soil under different land-use regimes. *Geoderma*, 420, 115880.