

Research Article

Assessment of Single and Multivariate Soil Quality Indices in the Part of Sarab Plain Agricultural Lands (East Azerbaijan Province)

**Sakineh Razavi Ghalehjoogh^{1✉}, Mohammad Reza Neyshabouri², Davoud Zarehaghi³,
Reza Hassanpour⁴**

1-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: srazavig@gmail.com

2-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: neyshmr@hotmail.com

3-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

4-Department of Soil and Water Research, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran.

Email: reza.hassanp@gmail.com

Received: December 27, 2024

Revised: March 4, 2025

Accepted: April 11, 2025

Published: May 11, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

Soil quality concept was initiated for the realization and strengthening of soil sustainable management particularly for sustained yield production as early as 1990 decade. At the time it was a qualitative concept but later evolved and expressed in quantitative term as soil quality index (SQI). Briefly, it is based on selecting soil properties (referred as indicators) that attribute to general soil wellness or particular soil function (e.g. yield production, nutrient cycling, carbon sequestration etc.), assigning an appropriate score (0 to 1) for each indicator and integrating (averaging) the scores and expressing the outcome as SQI. Substantial researches have been carried out on various aspects of the issue including indicators selection, their scoring, and score integration. However most of them have been generally-oriented or generally-purposed meaning that no particular or specific goal(s) has been in mind of the investigator. The SQI has often been determined by using the total available data (TDS) or a minimum set of data (MDS), hereafter would be referred as multivariate based SQI. In the present study, we also investigated S-index, relative bulk density (RBD) and least limiting water range (LLWR) by referring to them as a single variable quality index. The assessment of those multi and single variable based SQI in relation to winter wheat yield production was the major goal of the present research.

Methodology

In this research two types of indicator scoring functions (linear and non-linear) were applied to both TDS and MDS (identified by principle component analysis) to determine each selected indicator score. The scores were integrated as their simple average, weighed average, Nemero and scaled average methods. The corresponding quality indices were designated as SQI_{SA}, SQI_{WA}, SQI_N, and SQI_C, respectively. Considering the single based quality indices, SD was determined using S-index proposed by Dexter, RBD according to Jones and LLWR according to da Silva et al. The pertinent parameters were obtained from soil water release and soil penetration resistance curves determined at 173 sites and wheat grain yield was recorded at all sites as well.

Results

Linear and non-linear indicator scorings led to SQIs ranging from 0.28 to 0.53 being significantly different at 5% probability level. The four applied score integration methods also yielded statistically significant ($p < 0.05$) SQIs. For TDS, SQI_{SC} showed the highest quality index of 0.45 while for MDS, SQI_{WA} was the highest (0.45). The results clearly indicated significant interaction between scoring (linear and non-linear) and score integration methods for both TDS and MDS. On the basis of SQI_{WA}, at about 70% of the 173 studied locations, soil quality was graded as low or poor which is

in accordance with low grain yield obtained at nearly 65% of those locations. This implies the potential applicability of SQL_{WA} for wheat yield assessment at the studied area. Single variable based quality indices (SD, RBD, LLWR) were significantly ($p < 0.01$) correlated to SQIs, meaning that instead of set of variables (TDS or MDS), a single variable (e.g. RBD) may be adequate for soil quality assessment. Among the single variable indices, the LLWR showed the highest correlation ($r = 0.55^{**}$) with wheat yield. The RBD stood at the second place indicating its high adequacy for the soil quality assessment in relation to wheat yield.

Conclusion

Strongly significant ($p < 0.005$) correlation between MDS-based SQIs with those TDS-based ones along with low cost and less time needed for obtaining MDS (%clay, AWC, pH, $P_{av.}$, and $Mn_{av.}$ in the present study) in comparison to TDS (17 variables) indicated that the SQIs based on MDS may be preferred especially if periodic SQI assessment in the studied area is desired. Among the single variable based quality indices, the LLWR showed the highest correlation with grain yield indicating its potential applicability for soil quality assessment in relation to yield. Generalization of this finding needs more investigations. In the present study, accessibility to the biological soil variables which may attribute to SQIs was unfortunately impossible; their inclusion in SQIs assessment for the area would be much valuable. It was also implicitly assumed that no water stress has been occurred during the active growth period for the crop in the studied area which again needs to be considered in future investigations.

Keywords: Sarab plain, Single and multivariate quality indices, Soil quality index, Total and minimum data sets, Wheat grain yield.

Author Contributions

Conceptualization, M. R. N. and S. R. G.; methodology, M. R. N. and S. R. G.; software, R. H. and D. Z.; validation, S. R. G. and R. H.; formal analysis, S. R. G. and M. R. N.; investigation, S. R. G.; resources, S. R. G. and R. H.; data curation, S. R. G. and R. H.; writing- original data preparation, S. R. G.; writing-review and editing, M. R. N. and D. Z.; visualization, S. R. G.; supervision, M. R. N.; project administration, M. R. N. and D. Z.; funding acquisition, M. R. N. and S. R. G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors are thankful to the University of Tabriz for financial supports.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

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

Cite this article: Razavi Ghalehjoogh, S., Neyshabouri, M.R., Zarehaghi, D., & Hassanpour, R. (2025). Assessment of single and multi-variable soil quality indices in the part of Sarab plain agricultural lands (East Azerbaijan province). *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 31–50.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67245.1008>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک تک‌متغیره و چندمتغیره مینا در بخشی از اراضی کشاورزی دشت سراب (استان آذربایجان شرقی)

سکینه رضوی قلعه‌جوق^۱✉، محمدرضا نیشابوری^۲، داود زارع حقی^۳، رضا حسن‌پور^۴

۱-نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: srazavig@gmail.com

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: neyshmr@hotmail.com

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

۴- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، تبریز، ایران. رایانامه: reza.hassanp@gmail.com

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۲

چکیده

شاخص کیفیت خاک (SQI) موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران در سه دهه اخیر بوده اما اغلب جنبه کلی داشته یا محصول مینا نبوده‌است. هدف پژوهش حاضر، بررسی و ارزیابی کارایی روش‌های مختلف تعیین شاخص کیفیت خاک بر مبنای عملکرد محصول گندم آبی پاییزه در بخشی از اراضی دشت سراب بود. برای این کار، از توابع رتبه‌دهی خطی و غیرخطی و شیوه تلفیق رتبه افزودنی ساده (SA)، افزودنی وزنی (WA)، نمره (N) و مقیاس‌شده (SC) استفاده شد و شاخص‌های کیفیت با عنوان چندمتغیره مینا به‌ترتیب SQI_{SC}، SQI_{IN}، SQI_{IWA}، SQI_{ISA} هم برای مجموعه کل داده‌ها (TDS) و هم مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) و شاخص کیفیت فیزیکی خاک دکستر (S-index)، جرم مخصوص ظاهری نسبی (RBD) و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) با عنوان شاخص‌های کیفیت تک‌متغیره مینا محاسبه شدند. برای مجموعه TDS هر یک از توابع رتبه‌دهی (خطی و غیرخطی) منجر به SQIهای بین ۰/۲۸۰ تا ۰/۴۲۵ با تفاوت معنادار ($p < 0.05$) شد. برای مجموعه MDS نوع رتبه‌دهی بر SQI اثر معنادار نداشت. شیوه تلفیق رتبه‌ها نیز منجر به مقادیر متفاوت SQI شد. برای مجموعه TDS، شاخص کیفیت مقیاس‌شده (SQI_{SC}) و برای مجموعه حداقل داده‌ها، SQI_{IWA} بیشترین مقدار را داشتند (به‌ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۵۳). همبستگی قوی و معنادار ($r = 0.74$, $p < 0.01$) بین شاخص‌های کیفیت حاصل از دو مجموعه داده، نشانگر پتانسیل مجموعه MDS در برآورد شاخص کیفیت با صرفه‌جویی در هزینه و وقت، حداقل برای خاک‌های منطقه بود. بر مبنای درجه‌بندی SQI_{IWA}-MDS، خاک بیش از ۷۰ درصد مکان‌های مطالعه شده درجه کیفیت چهار (پایین یا فقیر) داشتند و در بیش از ۶۵ درصد مکان‌ها نیز عملکرد گندم آبی پاییزه کمتر از میانگین منطقه مورد بررسی (۴/۳ تن بر هکتار) بود و بیانگر هماهنگی شاخص کیفیت مذکور با عملکرد گندم و کارایی آن در بیان کیفیت خاک‌های منطقه بود. همبستگی معنادار ($p < 0.01$) بین شاخص‌های تک‌متغیره مینا (LLWR، RBD، S-index) با SQI بیانگر این بود که به‌جای به‌کارگیری مجموعه‌ای از ویژگی‌ها برای ارزیابی کیفیت خاک‌ها، می‌توان از یک یا دو شاخص تک‌متغیره استفاده کرد. در بین سه شاخص مذکور، LLWR بیشترین ضریب همبستگی ($r = 0.55^{**}$) را با عملکرد محصول داشت و RBD در مرتبه بعدی قرار گرفت که نشانگر توان بالقوه دو شاخص مذکور در ارزیابی وضعیت کیفیت خاک‌های منطقه با هدف عملکرد محصول گندم بود.

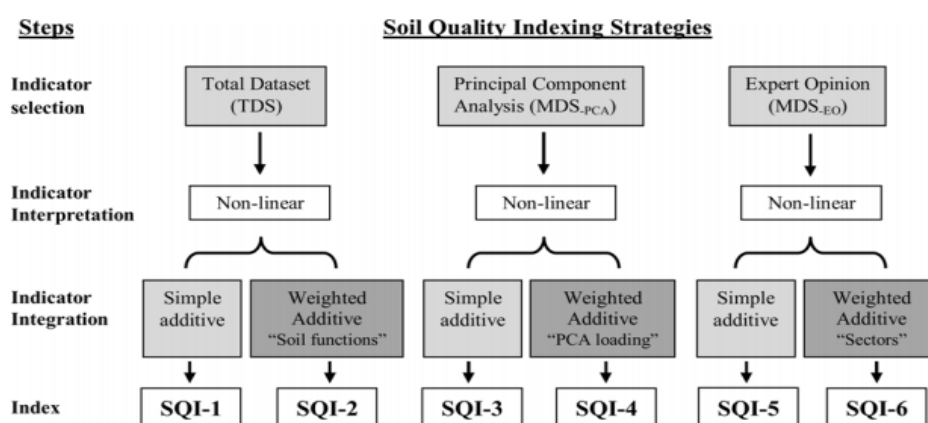
واژه‌های کلیدی: دشت سراب، شاخص کیفیت خاک چندمتغیره مینا، شاخص کیفیت خاک تک‌متغیره مینا، عملکرد محصول گندم، مجموعه حداقل داده‌ها

استناد به این مقاله: رضوی قلعه‌جوق، س.، نیشابوری، م.ر.، زارع حقی، د. و حسن‌پور، ر. (۱۴۰۴). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک تک‌متغیره و چندمتغیره مینا در بخشی از اراضی کشاورزی دشت سراب (استان آذربایجان شرقی). نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵ (۱)، ۳۱-۵۰.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67245.1008>

مقدمه

کیفیت خاک ابتدا در راستای محقق شدن کشاورزی پایدار و بیشتر با مد نظر قرار دادن توانمندی خاک در تولید پایدار محصول مطرح یا تعریف شده و در واقع به عنوان ابزاری برای مدیریت پایدار خاک و حفظ بهره‌وری آن است (Anonymous, 1991). کیفیت خاک از نظر مفهومی ماهیت کیفی دارد و نمایه‌سازی آن به صورت کمی در قالب شاخص کیفیت خاک^۱ انجام شده است. روش‌های متعددی برای ارزیابی شاخص کیفیت خاک توسعه یافته است. این روش‌ها شامل طراحی کارت‌های خاک و آزمون‌های سریع یا تست‌های کیت (Ditzler & Tugel, 2002)، روش‌های نمایه‌سازی کیفیت خاک (Sun et al., 2003) هستند. (Doran & Jones, 1996; Qi et al., 2009; Marzaioli et al., 2010) امروزه، نمایه‌سازی کیفیت خاک، رایج‌ترین روش برای ارزیابی شاخص کیفیت خاک است (Andrews et al., 2002a). برای نمایه‌سازی کیفیت خاک سه مرحله اساسی وجود دارد (شکل ۱) که شامل (۱) انتخاب نشانگرها، (۲) رتبه‌دهی به نشانگرهای انتخاب شده و (۳) تلفیق رتبه نشانگرها در یک شاخص می‌باشد (Karlen et al., 2003). نشانگرهای کیفیت خاک دربرگیرنده ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک هستند که به‌سہولت در پاسخ به تغییر شرایط خاک تغییر می‌کند (Brejda et al., 2000; Marzaioli et al., 2010).



شکل ۱- دستورالعمل کلی ارزیابی شاخص کیفیت خاک (Cherubin et al., 2016)

در بین نحوه انتخاب نشانگر برای ارزیابی کیفیت خاک، انتخاب مجموعه کل داده‌ها^۲ (TDS) و مجموعه حداقل داده‌ها^۳ (MDS) به‌طور گسترده‌ای رواج دارد (Cherubin et al., 2016). در اولی، معمولاً همه ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (والیته در دسترس) انتخاب می‌شوند. در دومی، تنها تعداد معدودی از ویژگی‌ها که از نظر کارشناسی مهمتر در کیفیت بوده یا از نظر آماری بخش بزرگی از تغییرات در کل ویژگی‌ها را توجیه می‌کنند، انتخاب می‌شوند. برخی محققان (Andrews et al., 2002a) این چنین نظر داده‌اند که با تعداد کمی از نشانگرهای کیفیت خاک نیز به شرطی که با دقت و با نظر کارشناسی انتخاب شوند، می‌توان از طریق رتبه‌بندی غیرخطی و با محاسبه شاخص کیفیت خاک به روش افزودنی ساده (شکل ۱) به اندازه کافی به دانسته‌های مورد نیاز برای انتخاب بهترین شیوه‌های مدیریتی دست یافت.

با عنایت به پژوهش‌های انجام‌شده در دهه ۱۹۹۰ (Doran & Parkin, 1994; Karlen et al., 1998; Seybold et al., 1998)، تأکید کردند که انتخاب نشانگر بایستی با توجه به هدف تعیین کیفیت و کارکرد (های) خاک مرتبط با هدف باشد و در این راستا سه هدف کلان مدیریتی و شش کارکرد مرتبط با آن‌ها را مشخص کردند.

^۱ Soil quality index (SQI)

^۲ Total data set (TDS)

^۳ Minimum data set (MDS)

علی‌رغم این به نظر می‌رسد در اغلب پژوهش‌ها، انتخاب نشانگرها بدون توجه به هدف خاص و بیشتر بر مبنای داده‌های موجود بوده است. در پژوهش‌های انجام شده به‌وسیله Rahmanipour et al. (2014) در اراضی کشاورزی استان قزوین و (Nabiollahi et al., 2017) در اراضی کشاورزی متأثر از شوری در استان کردستان، شاخص کیفیت خاک افزودنی وزنی محاسبه شده از مجموعه داده‌های حداقل بر دیگر شاخص‌ها برتری داشت. (Guo et al., 2017) نیز شاخص کیفیت افزودنی بر اساس مجموعه داده‌های حداقل را برای ارزیابی کیفیت خاک در مقیاس بزرگ توصیه کردند. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که روش مذکور به‌دلیل اینکه ویژگی‌های خاک برهمکنش پیچیده با یکدیگر دارند، برای شناسایی آن‌هایی که بیشترین نقش را در کیفیت خاک دارند، عملکرد بهتری داشته است؛ چون مستقل از قضاوت و سلیقه شخصی در انتخاب است (Rezaee et al., 2020; Qian et al., 2023; Damiba et al., 2024).

نشانگرهای انتخاب‌شده دارای مقیاس‌های عددی متفاوتی هستند و رتبه‌دهی به آن‌ها در مقیاس بدون بعد ۰ تا ۱ مرحله دوم در محاسبه شاخص کیفیت خاک است. رتبه‌دهی از روی توابعی است که به صورت خطی یا غیرخطی تعریف شده‌اند (Cherubin et al., 2016; Damiba et al., 2024). مهمترین چالش در به‌کارگیری این توابع انتخاب حدود آستانه برای نشانگرها است (Reynolds et al., 2008). علاوه بر اینکه حدود متفاوتی برای ویژگی‌های مشابه در مقالات ارائه شده، اساس یا مبنای انتخاب آن‌ها هم روشن نشده است. به عنوان مثال حد آستانه‌ای پایین و بالا برای فسفر قابل دسترس (برحسب ppm) به‌ترتیب برابر ۵ و ۳۰ به‌وسیله Masto et al. (2008)، ۲ و ۱۶ به‌وسیله Cherubin et al. (2016) و ۵ و ۵۵ به‌وسیله Damiba et al. (2024) گزارش شده است. این نوع عدم هماهنگی برای دیگر ویژگی‌ها هم کم و بیش در مقالات مشاهده می‌شود. در هر صورت انتخاب حدود آستانه برای نشانگرها در مرحله رتبه‌دهی بسیار مهم است. (Reynolds et al., 2008) تعمیم حدود از یک مکان به‌دست آمده به مکان دیگر را بدون توجه به هدف تعیین کیفیت خاک و ویژگی‌های خاص مکان دوم گمراه‌کننده دانستند.

تلفیق رتبه نشانگرها و نمایه‌سازی شاخص کیفیت خاک (تبدیل رتبه نشانگرها به کمیتی بین صفر و یک) به شیوه‌های مختلف از جمله افزودنی ساده (میانگین ساده رتبه‌ها)، افزودنی وزنی، نمر و مقیاس کردن انجام شده است. محققان متعددی در مطالعات خود از شیوه‌های مختلف نمایه‌سازی کیفیت خاک استفاده کرده و نتایج متفاوتی به‌دست آورده‌اند (Qi et al., 2009; Mukherjee & Lal, 2014; Nabiollahi et al., 2017).

بهره‌گیری از شاخص کیفیت خاک در ارزیابی اعمال مدیریت‌های مختلف خاک و اراضی به‌ویژه در میان‌مدت از کاربردهای مهم آن بوده است. (Shukla et al., 2006) با هدف ارزیابی نتیجه اعمال پنج نوع مدیریت کشت اراضی در ایالت اوهایو، شامل ذرت (Zee mayz) بدون خاکورزی بدون کود، ذرت بدون خاکورزی با کود، تناوب ذرت -سویا (Glycine max) بدون خاکورزی، ذرت خاکورزی معمولی و عل‌فزار به مقایسه شاخص کیفیت خاک بین آن‌ها پرداختند. از شاخص کیفیت خاک در ارزیابی روند وضعیت خاک‌های احیا شده (Saleh et al., 2021)، در پایش تأثیر مدیریت تلفیقی کود (Shah et al., 2022) و خاک‌های تحت بهره‌وری‌های مختلف (Damiba et al., 2024) نیز استفاده شده است.

همراه با شاخص‌های کیفیت خاک چندمتغیره مبنای شاخص دکستر (S-index)، جرم مخصوص ظاهری نسبی^۱ و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت^۲ نیز به عنوان شاخص‌های «تک‌متغیره مبنای» محاسبه شدند زیرا برای محاسبه آن‌ها به کمترین داده یا دانسته‌های خاک نیاز است. تجزیه و تحلیل و مقایسه شاخص‌های کیفیت به‌دست آمده با رویکردهای مختلف (چندمتغیره و تک‌متغیره مبنای) و تجزیه و تحلیل و بررسی آن‌ها از جنبه‌های مختلف و در ارتباط با عملکرد محصول گندم در منطقه هدف نهایی پژوهش حاضر می‌باشد.

¹ Relative bulk density (RBD)

² Least limiting water range (LLWR)

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی بخش‌هایی از مزارع گندم آبی دشت سراب به مساحت تقریبی ۸۸۵ هکتار واقع در استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران است. منطقه در طول جغرافیایی $38^{\circ} 00'$ تا $37^{\circ} 56'$ و عرض جغرافیایی $47^{\circ} 28'$ تا $47^{\circ} 26'$ قرار دارد و دارای میانگین بارندگی سالانه $238/3$ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه $9/37$ درجه سلسیوس است (گزارش‌های اقلیمی اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، <http://eamo.ir>). خاک‌های منطقه دارای رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک بودند (Banaie, 1998) و بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی، در رده انتی‌سولز و اینسپتی‌سولز طبقه‌بندی شدند (Anonymous., 1988). آبیاری مزارع گندم به روش غرقاب سطحی انجام می‌گیرد. تاریخ کاشت از ماه مهر شروع و تاریخ برداشت از ماه مرداد آغاز می‌شود. خاکورزی به روش متداول (شخم برگردان، دیسک و کولتیواتور) انجام می‌گیرد.

اندازه‌گیری‌ها و محاسبات

در این پژوهش از اطلاعات و داده‌های خاک جمع‌آوری شده از ۱۷۳ مزرعه گندم در دشت سراب (Anonymous, 2015) استفاده گردید. لیست داده‌ها در جدول ۱ و آماره‌های آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است و شامل ۱۷ ویژگی می‌باشد. جرم مخصوص ظاهری^۱ با به‌کارگیری ۳۴ مجموعه داده درصد شن، سیلت، رس، ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری که در پژوهش‌های پیشین (Rezaee, 1996) در منطقه اندازه‌گیری شده بود، از تابع انتقالی ایجاد شده زیر به‌دست آمد:

$$BD = -106.924 + 1.0883 S + 1.0810 Si + 1.08364 C - 0.0449 OM, \quad R = 0.774^{**} \quad (1)$$

BD جرم مخصوص ظاهری بر حسب $g \text{ cm}^{-3}$ و OM, C, Si, S به‌ترتیب درصدهای شن، سیلت، رس و ماده آلی خاک می‌باشند. مدل ونگنوختن (رابطه ۲) برای تعیین معادله منحنی مشخصه رطوبتی خاک به‌کار گرفته شد:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m, \quad m = 1 - 1/n \quad (2)$$

در رابطه مذکور، S_e اشباع مؤثر (بدون بعد)، h (cm) مکش ماتریک خاک و a (cm^{-1})، n ، m ، θ_r (بدون بعد) پارامترهای مدل هستند که با وارد کردن مقادیر شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری در نرم‌افزار RETC (Van Genuchten et al., 1991) به‌دست آمد. برای تعیین رابطه بین مقاومت فروروی و رطوبت خاک از مدل لگاریتمی و ضرایب پیشنهادی (da Silva & Kay, 1997) (رابطه ۳) استفاده شد:

$$\ln SR = \ln c + d \ln \theta + e \ln Db \quad (3)$$

در رابطه بالا SR (MPa)، θ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، Db (g cm^{-3}) به‌ترتیب رطوبت مقاومت فروروی، رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک هستند.

شاخص کیفیت خاک

در این پژوهش شاخص‌های کیفیت خاک در دو بخش جداگانه به شرح زیر محاسبه شد.

شاخص کیفیت خاک چندمتغیره مبنا

¹ Bulk density (BD)

انتخاب نشانگرها: نشانگرهای شاخص کیفیت خاک می‌تواند شامل کلیه داده‌های موجود (۱۷ ویژگی) و یا مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) از بین آن‌ها باشد. برای تعیین مجموعه اخیر، از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) استفاده شد. مؤلفه‌های اصلی با مقادیر ویژه بیش از یک و در هر مؤلفه نیز متغیرهایی دارای ۱۰ درصد بیشترین فاکتور بارگذاری یا ضریب عاملی^۲ به عنوان MDS انتخاب شدند. در هر مؤلفه انتخاب شده در صورت وجود همبستگی معنادار ($r > 0.60$)، بین ویژگی‌ها فقط ویژگی با بیشترین ضریب عاملی حفظ شده و سایر متغیرها برای جلوگیری از افزونگی^۳ کنار گذاشته شدند (Andrews et al., 2002b; Mukherjee & Lal, 2014).

رتبه‌دهی به ویژگی‌ها: از آنجا که واحد و مقیاس نشانگرهای انتخاب شده با یکدیگر تفاوت دارند، از توابع رتبه‌دهی زیر برای تبدیل کمیت هر نشانگر به مقادیر بین صفر و یک استفاده شد (Andrews et al., 2002a)

الف- تابع رتبه‌دهی خطی^۴ (LSF): در رتبه‌دهی خطی به ویژگی‌های منتخب (MDS, TDS) بسته به نحوه تأثیرپذیری کیفیت از ویژگی، از سه نوع تابع رتبه‌دهی (بیشتر-بهرتر، کمتر-بهرتر، بهینه-بهرتر) به کار رفته در منابع استفاده گردید (Karlen & Stott, 1994; Wymore, 1993). نوع تابع رتبه‌دهی و مقادیر حد بالا و حد پایین برای هر ویژگی در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱- ویژگی‌ها، حدود بالا و پایین و بهینه آن‌ها و نوع تابع رتبه‌دهی.

ردیف	ویژگی	نوع تابع امتیازدهی	حد پایین	حد بالا	حد بهینه	منابع
۱	Clay (%)	بهینه بهتر	۵	۶۰	۱۰-۲۵	Armenise et al. (2013)
۲	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	بیشتر بهتر	۰/۳۸	۰/۵۳	-	Rawls et al. (1982)
۳	θ_{33} (cm ³ cm ⁻³)	بیشتر بهتر	۰/۳	۰/۳۵	-	Reynolds et al. (2008)
۴	θ_{1500} (cm ³ cm ⁻³)	بیشتر بهتر	۰/۰۳۳	۰/۲۷	-	Rawls et al. (1982)
۵	AWC (cm ³ cm ⁻³)	بیشتر بهتر	۰/۱	۰/۲	-	Reynolds et al. (2008)
۶	RWC	بیشتر بهتر	۰/۶	۰/۷	-	Reynolds et al. (2008)
۷	K_s (cm h ⁻¹)	بیشتر بهتر	۱	۱۵	-	Vadivel & Shivana (2020)
۸	BD (g cm ⁻³)	کمتر بهتر	۱/۱	۱/۳۴	-	Jones (1983)
۹	OC (درصد وزنی)	بیشتر بهتر	۳	۵	-	Reynolds et al. (2008)
۱۰	pH	بهینه بهتر	۵	۸/۳۰	۶/۵-۷/۵	Moody (2006) & Hosseinpour (2008)
۱۱	EC(dS.m ⁻¹)	کمتر بهتر	۰/۵	۶	-	Ranjbar (2015) & Carlson et al.(2019)
۱۲	K_{ava} (mg kg ⁻¹)	بیشتر بهتر	۱۲۰	۲۵۰	-	Shahbazi & Besharati (2013)
۱۳	P_{ava} (mg kg ⁻¹)	بیشتر بهتر	۱۰	۲۰	-	Shahbazi & Besharati (2013)
۱۴	Zn_{ava} (mg kg ⁻¹)	بیشتر بهتر	۰/۵	۱	-	Shahbazi & Besharati (2013)
۱۵	Mn_{ava} (mg kg ⁻¹)	بیشتر بهتر	۹	۱۲	-	Faiziasl et al.(2003)
۱۶	Cu_{ava} (mg kg ⁻¹)	کمتر بهتر	۰/۲	۱	-	Shahbazi & Besharati (2013)
۱۷	Fe_{ava} (mg kg ⁻¹)	بیشتر بهتر	۱۱	۱۶	-	Faiziasl et al.(2003)

θ_{1500} , θ_{33} , θ_s به ترتیب رطوبت اشباع، رطوبت معادل مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، $AWC (= \theta_{33} - \theta_{1500})$ ، $RWC (= \theta_{33} / \theta_s)$ به ترتیب گنجایش آب قابل استفاده و گنجایش نسبی آب است. بقیه علائم یا مخفف‌ها، متداول هستند. مقادیر θ_{1500} , θ_{33} , θ_s و K_s از نرم‌افزار RETC (روزتا) به دست آمد.

¹ Principal component analysis

² Loading factor

³ Redundancy

⁴ Linear scoring function (LSF)

ب- تابع رتبه‌دهی غیرخطی^۱ (NLSF): در این شیوه رابطه بین "رتبه" ویژگی (S) و مقدار عددی آن (x) غیرخطی و عموماً از نوع تابع سیگموئیدی (S شکل) فرض می‌شود (Bastida et al., 2006; Saleh et al., 2021).

$$NLSF = 1 / (1 + (\frac{x}{x_0})^b) \quad (4)$$

در معادله بالا: رتبه ویژگی باز بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند، X: مقدار ویژگی، x_0 : میانگین مقدار هر ویژگی و b شیب معادله است که برای گروه "بیشتر بهتر" ۲/۵- و گروه "کمتر بهتر" ۲/۵+ پیشنهاد شده است (Sinha et al., 2009; Askari & Holden, 2014). تابع دیگر برای رتبه‌دهی غیرخطی به صورت زیر است (Glover et al., 2000; Masto et al., 2008). در X مقدار نشانگر، A خط پایه (مقدار نشانگر در S=۰/۵) و b شیب تابع در x=A می‌باشد:

$$NLSF = \frac{1}{1 + e^{-b(X-A)}} \quad (5)$$

وزن‌دهی: وزن‌دهی به رتبه هر ویژگی (نشانگر) انتخاب شده از طریق MDS با استفاده از جدول تجزیه به مولفه‌های اصلی و بر اساس نسبت واریانس هر متغیر به کل واریانس انباشته انجام شد (Rezaee et al., 2020). در مجموعه داده کل (TDS) وزن هر ویژگی از تقسیم ضریب تغییرات آن ویژگی، بر مجموع ضرایب تغییرات کل ویژگی‌ها از رابطه ۴ به دست آمد (Ortega & Santibanez, 2007). W_i وزن هریک از ویژگی‌های i و CV_i ضریب تغییرات هر یک از ویژگی‌ها می‌باشد:

$$W_i = \frac{CV_i}{\sum CV_i} \quad (6)$$

تلفیق رتبه نشانگرها و تبدیل آن‌ها به شاخص کیفیت: در این پژوهش از چهار شیوه تلفیق برای محاسبه SQI به شرح زیر استفاده شد.

الف- شاخص کیفیت خاک افزودنی وزنی^۲ (SQI_{WA}): از رابطه ۷ محاسبه شد (Andrews et al., 2002b; Doran & Parkin, 1994). W_i و S_i به ترتیب وزن و رتبه نشانگر i ام هستند.

$$SQI_{WA} = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (7)$$

ب- شاخص کیفیت خاک افزودنی ساده^۳ (SQI_{SA}): ارایه شده به وسیله Andrews et al. (2002a) و Andrews et al. (2004) از رابطه ۸ به دست آمد (S_i رتبه نشانگر و n تعداد نشانگرها).

$$SQI_{SA} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (8)$$

ج- شاخص کیفیت خاک نمره (SQI_N): بر اساس میانگین و حداقل رتبه^۴ (S_{min} , S_{ave}) نشانگرها در هر خاک محاسبه شد (Qin & Zhao, 2000).

$$SQI_N = \sqrt{\frac{S_{ave}^2 + S_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (9)$$

د- شاخص کیفیت خاک مقیاس شده (SQI_{SC}): این شاخص که به وسیله Mukherjee & Lal (2014) مطرح گردیده از روابط ۱۰ و ۱۱ حاصل شد.

$$SQI_{SC} = (SQI - SQI_{min}) / (SQI_{max} - SQI_{min}) \quad (10)$$

¹ Non linear score function

² Weighted additive SQI

³ Simple additive SQI

$$SQI = \sum \text{Individual soil parameter index values} \quad (11)$$

در معادلات فوق SQI_{min} و SQI_{max} به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار شاخص کیفیت در بین کل مجموعه خاک‌ها و SQI_{sc} شاخص کیفیت مقیاس شده هر خاک است. مزیت این روش این می‌تواند باشد که تغییرات کیفیت در مکان‌ها یا مزارع مختلف را نسبت بهم در یک منطقه نشان دهد.

شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهادی دکستر (S-index) از روی پارامترهای مدل ونگنوختن (Dexter, 2004a)، RBD بر مبنای روابط ارایه شده به وسیله Jones (1983) و LLWR طبق دستورالعمل (da Silva et al. (1994 محاسبه شدند.

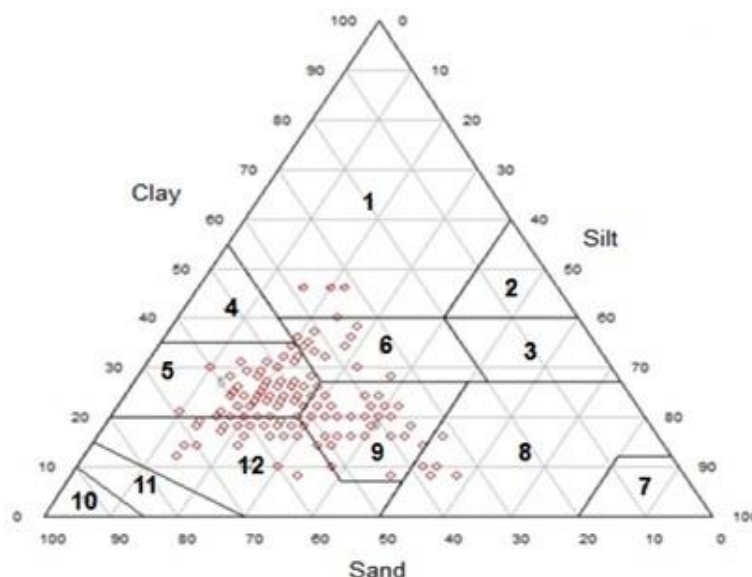
نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی داده‌ها

خاک‌های مورد بررسی متعلق به شش کلاس بافتی در نظام USDA در شکل ۱ ارایه شده است. کلاس‌های بافت لوم رسی شنی و لوم به ترتیب نزدیک به ۳۹ و ۳۰ درصد کل خاک‌های منطقه را تشکیل می‌دهند. بافت رسی تنها حدود ۲ درصد خاک‌های منطقه است، در حالت کلی خاک‌های منطقه در کلاس متوسط تا متوسط ریز قرار می‌گیرند (Weil & Brady, 2017).

USDA:

1. Clay
2. Silty clay
3. Silty clay loam
4. Sandy clay
5. Sandy clay loam
6. Clay loam
7. Silt
8. Silty loam
9. Loam
10. Sand
11. Loamy sand
12. Sandy loam



شکل ۱- توزیع کلاس‌های بافت خاک در ۱۷۳ مکان مورد بررسی دشت سراب.

بر اساس شکل ۱، نزدیک به ۹۵ درصد خاک‌های منطقه مورد بررسی در چهار کلاس بافت لوم رسی، لوم رسی شنی، لوم و لوم شنی قرار می‌گیرند و از نظر بافت قاعده‌تاً نباید محدودیت فیزیکی جدی برای کیفیت خاک ایجاد شود. آماره‌های توصیفی ۱۷ ویژگی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شدند. بر اساس حدود پیشنهاد شده در مطالعه Shakouri Katigeri et al. (2019) ویژگی‌های با CV کمتر از ۱۵ درصد به عنوان ویژگی‌های با تغییرپذیری کم (۴۱/۲ درصد ویژگی‌ها در مطالعه حاضر)، ویژگی‌های با CV ۱۵ تا ۳۵ درصد به عنوان ویژگی‌های با تغییرپذیری متوسط (۳۵/۳ درصد ویژگی‌ها در مطالعه حاضر) و ویژگی‌های با CV بزرگ‌تر از ۳۵ درصد به عنوان ویژگی‌های با تغییرپذیری

زیاد (۲۹/۴ درصد ویژگی‌ها در مطالعه حاضر) در نظر گرفته شدند. ضریب تغییرات^۱ (CV) ویژگی‌ها از حدود ۳ درصد برای pH تا ۸۶/۰ درصد برای فسفر تغییر کرد. pH بر پایه یک مقیاس لگاریتمی است و برای یک تغییر کوچک در آن غلظت پروتون در محلول خاک باید به میزان زیادی تغییر کند (Sun et al., 2003). از این رو، این ویژگی کمترین ضریب تغییرات را بخود اختصاص داده است. از دلایل بیشتر بودن ضریب تغییرات فسفر در خاک‌های منطقه، تحرک کم، مصرف کود فسفر و احتمالاً تجمع این عنصر در خاک سطحی است (Shakouri Katigeri et al., 2019).

جدول ۲-آماره‌های توصیفی ۱۷ ویژگی خاک‌های منطقه مورد بررسی و عملکرد محصول گندم.

ویژگی‌های خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	انحراف استاندارد	چولگی	تیزی	ضریب تغییرات	تغییرپذیری	*آماره K-S	نوع توزیع
درصد رس	۸	۴۶	۲۱/۹	۲۰	۷/۰۸	۰/۷۸	۱/۲۸	۳۲/۲	متوسط	۰/۱۲	nN
$\theta_s(v/v)$	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۰۲	۰/۵۵	۰/۷۴	۵/۰	کم	۰/۱۶	nN
$\theta_{33}(v/v)$	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۶۲	۱۱/۹	کم	۰/۱۰	N
$\theta_{1500}(v/v)$	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۷۳	۰/۹۸	۲۰/۳	متوسط	۰/۱۷	nN
AWC(v/v)	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۶۴	۰/۸۰	۱۴/۵	کم	۰/۱۶	nN
RWC	۰/۳۹	۰/۶۶	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۰۴	۰/۵۵	۰/۹۴	۷/۸	کم	۰/۰۹	nN
$K_s(cm.h^{-1})$	۰/۳۸	۲/۸۴	۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۳۴	۲/۵۶	۸/۸۷	۰/۴	بالا	۰/۱۸	nN
BD (gcm^{-3})	۱/۲۵	۱/۶۳	۱/۴۵	۱/۴۶	۰/۰۷	۰/۳۱	۰/۲۳	۵/۳	کم	۰/۰۷	N
کربن آلی	۰/۷۱	۲/۴۷	۱/۴۳	۱/۴۰	۰/۳۳	۰/۲۱	۰/۲۷	۲۳/۵	متوسط	۰/۴۸	N
pH	۷/۰۴	۸/۸۶	۷/۷۱	۷/۷۳	۰/۲۲	۰/۱۶	۴/۲۳	۲/۹	کم	۰/۰۸	nN
EC($dS m^{-1}$)	۰/۱۵	۳/۶۴	۱/۱۵	۱/۰۹	۰/۵۱	۱/۴	۳/۳۳	۴۴/۷	بالا	۰/۰۹	nN
$K_{ava.}(mg kg^{-1})$	۲۹۶/۳	۱۷۶۷	۸۰۶/۵	۸۰۶/۹	۲۴۴/۳	۰/۳۲	۰/۵۳	۳۰/۳	متوسط	۰/۰۴	N
$P_{ava.}(mg kg^{-1})$	۰/۳۷	۷۹/۵۱	۱۱/۵۶	۸/۱۲	۹/۹۴	۲/۶	۱۲/۳۸	۸۶/۰	بالا	۰/۱۶	nN
$Zn_{ava.}(mg kg^{-1})$	۰/۰۴	۱/۳۲	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۲۲	۱/۸۲	۳/۸۶	۶۶/۹	بالا	۰/۲۱	nN
$Mn_{ava.}(mg kg^{-1})$	۲/۸۴	۹/۲۴	۶/۹۰	۶/۰۰	۰/۹۳	۰/۷۳	۱/۴۸	۱۳/۶	کم	۰/۰۷	nN
$Cu_{ava.}(mg kg^{-1})$	۰/۵۲	۴/۸۴	۲/۲۵	۲/۲۸	۰/۶۵	۰/۲۲	۰/۷۲	۲۹/۰	متوسط	۰/۰۵	N
$Fe_{ava.}(mg kg^{-1})$	۴/۶۴	۴۱/۰۰	۱۴/۰۰	۱۱/۱۶	۷/۱۷	۰/۶۸	۰/۱۹	۵۱/۲	بالا	۰/۱۷	nN
Yield ($Kg h^{-1}$)	۳۰۰۰	۷۳۰۰	۴۳۲۷	۴۱۰۰	۷۶۱/۲۹	۱/۵۱	۳/۲۷	۱۷/۶	متوسط	۰/۱۶	nN

N: توزیع نرمال و nN: توزیع غیرنرمال

*کولموگروف-اسمیرنوف

مجموعه حداقل داده‌ها (MDS)

شرط لازم برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و کاهش متغیرها و دستیابی به یک مجموعه حداقل داده‌ها، به‌کارگیری معیارهای آزمون کایزر-مایر-اولکین^۲ (KMO) و آزمون کرویت بارتلت^۳ (BTS) است (Jolliffe, 1986). در مطالعه حاضر مقدار آزمون KMO بزرگتر از ۰/۶ و آزمون BTS معنادار ($p < 0.05$) بودند و بنابراین داده‌ها برای انجام PCA مناسب

¹ Coefficient of variation

² Kaiser-Meyer-Olkin

³ Bartlett's test of sphericity

بودند. بر اساس نتیجه حاصل، پنج مولفه اصلی با مقادیر ویژه^۱ بیش از یک (جدول ۳) که توانستند ۷۸ درصد تغییرات کل داده‌ها را توجیه کنند، انتخاب شدند.

جدول ۳- تجزیه به مولفه‌های اصلی برای تعیین مجموعه داده حداقل (MDS).

مؤلفه ۵	مؤلفه ۴	مؤلفه ۳	مؤلفه ۲	مؤلفه ۱	خصوصیات خاک
۱/۳۹۳	۱/۶۰۴	۱/۶۶۳	۴/۱۱۹	۴/۵۱۹	مقادیر ویژه
۸/۱۹۶	۹/۴۳۷	۹/۷۸۱	۲۴/۲۳۲	۲۶/۵۸۲	درصد واریانس نسبی
۷۸/۲۲۹	۷۰/۰۳۲	۶۰/۵۹۵	۵۰/۸۱۴	۲۶/۵۸۲	درصد واریانس تجمعی
					بردارهای ویژه
-۰/۰۵۱	۰/۰۴۳	-۰/۱۴۸	۰/۰۶۲	۰/۹۵۷	Clay
۰/۰۶۰	-۰/۱۴۴	-۰/۰۸۴	۰/۵۲۲	۰/۷۵۲	θ_s
-۰/۰۷۷	۰/۰۴۵	-۰/۰۵۶	۰/۶۶۹	۰/۷۲۲	θ_{33}
-۰/۰۷۹	۰/۰۳۱	-۰/۱۷۳	۰/۰۰۶	۰/۹۴۳	θ_{1500}
-۰/۰۰۳	۰/۰۱۸	۰/۰۷۳	۰/۹۵۳	۰/۰۶۲	AWC
-۰/۱۲۱	-۰/۰۵۲	-۰/۰۲۵	۰/۷۱۲	۰/۵۹۸	RWC
-۰/۱۵۴	۰/۰۶۱	-۰/۰۹۲	۰/۲۷۴	-۰/۸۱۶	K_s
-۰/۱۰۱	-۰/۱۳۶	-۰/۰۳۹	-۰/۹۵۱	۰/۰۵۹	BD
۰/۱۸۱	۰/۳۸۸	-۰/۱۱۱	۰/۷۱۷	-۰/۰۲۴	کربن آلی
۰/۰۲۸	-۰/۰۵۵	۰/۷۹۷	-۰/۰۶۰	۰/۰۴۳	pH
-۰/۳۳۰	۰/۳۰۹	۰/۲۷۹	۰/۰۹۰	۰/۲۳۰	EC
۰/۱۳۵	۰/۶۳۷	-۰/۰۸۲	۰/۱۱۷	۰/۴۱۰	K_{ava}
۰/۰۰۰	۰/۸۷۷	۰/۰۷۲	۰/۱۳۶	-۰/۱۷۴	P_{ava}
۰/۲۰۰	۰/۳۳۸	۰/۵۵۵	۰/۴۸۶	-۰/۲۷۲	Zn_{ava}
۰/۸۲۰	۰/۰۹۳	-۰/۱۵۱	۰/۰۲۵	۰/۱۷۵	Mn_{ava}
۰/۲۸۳	-۰/۰۳۵	-۰/۶۶۱	۰/۰۲۱	۰/۳۵۸	Cu_{ava}
۰/۶۱۰	۰/۰۷۲	۰/۲۹۴	۰/۴۱۷	-۰/۳۲۸	Fe_{ava}

انتخاب متغیرها از هر یک از پنج مؤلفه باتوجه به مقادیر بردار ویژه آن‌ها و همبستگی بین آن‌ها انجام شد (Mukherjee & Lal, 2014; Rezaee et al., 2020). بر این اساس، پنج ویژگی Clay، AWC، pH، P و Mn به‌عنوان نشانگرهای کیفیت در MDS تعیین گردید.

شاخص‌های کیفیت خاک

شاخص‌های کیفیت خاک چندمتغیره مبنا

میانگین مقادیر SQI در ۱۷۳ مکان برای هر یک از ترکیب‌های شیوه رتبه‌دهی و تلقیق رتبه و مقایسه آماری بین آن‌ها برای هر دو مجموعه داده‌ها (MDS، TDS) در جدول ۴ ارائه شده است. شاخص کیفیت مقیاس شده (ردیف SC جدول) منحصراً

^۱ Eigen value

بر مبنای مقادیر حداقل و حداکثر نشانگر محاسبه شده است (رابطه ۱۰ و ۱۱) و لذا مقادیر آن در ستون‌های NLS-G، NLS-sig و LS خالی است. مقایسه میانگین‌ها در هر ستون و ردیف انتهایی جدول مستقل از یکدیگر انجام شده است و در هر یک، مقادیر SQI‌های با حروف مشابه، تفاوت معنادار ($P < 0.05$) ندارند.

جدول ۴- میانگین شاخص کیفیت خاک (۱۷۳ مزرعه)، محاسبه شده با به‌کارگیری رتبه‌دهی خطی و غیرخطی (روابط ۴-۵) به نشانگرها (MDS, TDS) و چهار روش تلفیق رتبه (روابط ۷-۱۰).

SQI	LS**	NLS-Sig*	NLS-G*	Mean1	LS**	NLS-Sig*	NLS-G*	Mean2
	TDS				MDS			
SA	0.41	0.48	0.31	0.40a	0.5	0.47	0.45	0.47a
WA	0.39	0.45	0.33	0.39a	0.5	0.55	0.54	0.53b
N	0.27	0.32	0.20	0.26b	0.29	0.27	0.25	0.27c
SC	-	-	-	0.45c	-	-	-	0.46a
Mean3	0.357a	0.425b	0.280c	<u>0.375</u>	0.430d	0.430d	0.417d	<u>0.432</u>

LS: رتبه‌دهی خطی، NLS-Sig: رتبه‌دهی به روش غیرخطی-تابع سیگموئید، NLS-G: رتبه‌دهی به روش غیرخطی-تابع گلوور.

بر مبنای روابط ۴ تا ۵ و ۷ تا ۱۰ مشخص است که شاخص کیفیت وابسته به نوع تابع رتبه‌دهی (SI^1) و تلفیق رتبه (SI^2) است؛ به عبارت دیگر، $SQI = f(SF, SI)$. مقایسه میانگین‌ها در ردیف انتهایی جدول ۴ (Mean3) نشان می‌دهد که فارغ از شیوه تلفیق رتبه‌ها، اثر نوع رتبه‌دهی روی SQI معنادار ($P < 0.05$) است. برای مجموعه TDS هر یک از چهار نوع رتبه‌دهی منجر به شاخص‌های کیفیت متفاوت بین ۰/۲۸۰ تا ۰/۴۲۵ شد و تفاوت بین آن‌ها هم از نظر آماری معنادار بود ($p < 0.05$). برای مجموعه MDS، نوع رتبه‌دهی اثر معنادار روی SQI‌ها نداشته است. در این مجموعه داده‌ها، تنها ۵ نشانگر در محاسبه کیفیت دخیل بودند و لذا اثرگذاری نوع رتبه‌دهی بر شاخص کیفیت مجال بروز پیدا نکرده در صورتی که در مجموعه TDS با ۱۷ نشانگر نوع رتبه‌دهی اثر خودش را بروز داده است.

مطابق جدول ۴، فارغ از نوع رتبه‌دهی، شیوه تلفیق رتبه‌ها نیز منجر به مقادیر متفاوت SQI شد (ستون‌های Mean1 و Mean2). برای مجموعه TDS شاخص کیفیت مقیاس شده بیشترین مقدار (۰/۴۵) را داشت اما برای مجموعه MDS شاخص کیفیت افزودنی وزنی (WA) بیشترین مقدار (۰/۵۳) را بخود گرفت و نشان دهنده نقش تعداد نشانگر و اهمیت نوع تلفیق رتبه‌ها در محاسبه شاخص کیفیت خاک است. در هر دو مجموعه داده‌ها، شاخص کیفیت به روش نمره (N) کمترین مقدار (۰/۲۶) را داشت. تفاوت بین دو شاخص به‌وسیله (Nabiollahi et al. (2017) نیز گزارش شده است. مطابق رابطه ۹، روش مذکور در محاسبه شاخص کیفیت علاوه بر میانگین رتبه نشانگرها، رتبه حداقل بین نشانگرها را نیز در نظر می‌گیرد و بالطبع باعث تنزل در مقدار شاخص می‌شود. شاخص کیفیت با تلفیق رتبه‌ها به روش افزودنی وزنی (یا میانگین وزنی، SQI_{WA}) منجر به بیشترین شاخص کیفیت (۰/۵۳) به‌ویژه برای MDS شد و این ضرورت توجه به وزن‌دهی (درجه اثرگذاری) به نشانگرها را در تعیین شاخص کیفیت خاک بیان می‌کند. از نظر تأثیر MDS و TDS، روی شاخص کیفیت، به‌طور کلی فارغ از نوع رتبه‌دهی و شیوه تلفیق رتبه، مجموعه MDS شاخص کیفیت را به‌طور معنادار بزرگ‌تر یا بهتر از مجموعه TDS برآورد کرد. بنابراین، به‌جای استفاده از همه ۱۷ متغیر به عنوان نشانگر کیفیت می‌توان از پنج متغیر (مجموعه MDS) برای محاسبه شاخص کیفیت خاک منطقه مورد بررسی استفاده کرد و به‌طور قابل ملاحظه‌ای در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد؛ به‌ویژه اگر ارزیابی منظم یا دوره‌ای شاخص کیفیت در یک منطقه مشخص مد نظر باشد. این یافته با گزارش Andrews et al. (2002a) همخوانی داشت. (Guo et al. (2017) نیز مجموعه داده‌های حداقل را برای ارزیابی

¹ Score function

² Score integration

کیفیت خاک در مقیاس بزرگ توصیه کردند. (Qi et al., 2009) اشاره کردند که استفاده از مجموعه داده‌ی حداقل می‌تواند برای یک منطقه کافی باشد. البته عمومیت دادن به این موضوع نیازمند بررسی در مناطق دیگر با تنوع خاک بیشتر است. این سؤال که وضعیت کیفیت خاک در ۱۷۳ مکان در مساحت ۸۸۵ هکتار چگونه قابل توصیف است، جای بحث دارد. درجات^۱ کیفیت خاک‌ها عمدتاً بر پایه SQI_{IN}, SQI_{WA} در چندین منبع گزارش شده است (Qi et al., 2009; Rahmanipour et al., 2019; Mulyono et al., 2017; Nabiollahi et al., 2014; et al., 2019)، اما اولاً مبنای درجه‌بندی نامشخص مانده و یا ذکر نشده که کدام کارکرد خاک (عملکرد، ذخیره‌سازی و انتقال، تثبیت کربن و غیره) ملاک بوده است. واقعیت این است هم انتخاب نوع یا مدل شاخص کیفیت و هم درجه‌بندی آن بدون توجه به هدف معین می‌تواند بی‌فایده و یا گمراه کننده باشد (Wienhold et al., 2009)، ثانیاً همخوانی یا هماهنگی بین درجه‌بندی‌ها هم دیده نمی‌شود. به عنوان مثال (Qi et al., 2009) شاخص کیفیت بیشتر از ۰/۷۷ را «خیلی خوب» و کمتر از ۰/۵۷ را «خیلی پایین یا فقیر» معرفی کرده‌اند در حالی که Mulyono et al. (2019) داده‌ای ذکر شده را به‌ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۲۰ دانسته و به‌کار برده‌اند. جدول ۵ توزیع SQI_{WA} در ۱۷۳ مکان را مطابق چهار منبع مذکور نشان می‌دهد.

جدول ۵- توزیع (درصد نسبت به ۱۷۳ مکان) درجه شاخص کیفیت خاک (SQI_{WA}, MDS) بر اساس گزارش چهار منبع مختلف.

درجه کیفیت بر مبنای (SQI _{WA})	Qi et al. (2009)	Rahmanipour et al. (2014)	Nabiollahi et al. (2017)	Mulyono et al. (2019)
I	۱/۵٪	۵,۲۰٪	۴٪	۰
II	۳/۵٪	۱۶,۷۶٪	۲۲٪	۲۲٪
III	۲۳٪	۱۸,۴۹٪	۴۰٪	۷۸٪
IV	۷۲٪	۵۳,۱۷٪	۳۴٪	۰
V	-	۶,۳۵٪	-	۰

اگر درجه‌بندی (Qi et al., 2009) مورد ملاک قرار گیرد (با توجه بر اینکه درجه‌بندی از روی اطلاعات حاصله از ۴۳۰ مکان در وسعت ۴۱۹ کیلومتر مربع با انواع خاک‌های زراعی بوده است)، خاک بیش از ۷۰ درصد مکان‌های مطالعه شده درجه کیفیت چهار (پایین یا فقیر) و تنها ۵ درصد درجه یک و دو دارند. جالب است که در بیش از ۶۵ درصد مکان‌ها نیز محصول گندم آبی پاییزه کمتر از میانگین (۴/۳ تن بر هکتار) و تنها در ۳ درصد مکان‌ها محصول بیشتر از ۷ تن بر هکتار است. جمع بندی این است که درجه‌بندی کیفیت خاک اراضی منطقه مطالعه شده بر مبنای (SQI_{WA}, MDS) مطابق با Qi et al. (2009) همخوانی خوبی با عملکرد دارد و این نوع یا مدل شاخص کیفیت انعکاس واقع بینانه‌تری از وضع کیفیت خاک را از جنبه عملکرد برای منطقه ارائه می‌دهد.

مقایسه شاخص‌های کیفیت

مقایسه و بررسی همبستگی بین شاخص‌های کیفیت تک‌متغیره و چندمتغیره مبنا برای مجموعه داده‌های TDS و MDS در جدول ۶ ارائه شده است.

¹ Grade

جدول ۶- همبستگی بین سه شاخص کیفیت تک‌متغیره و چهار شاخص چندمتغیره مبنادر (با رتبه‌دهی غیرخطی سیگموییدی) برای سری داده‌های TDS, MDS

چند متغیره	تک متغیره	TDS			MDS		
		RBD	S-Index	LLWR	RBD	S-Index	LLWR
SQI _{SA}		-۰/۶۹۹**	۰/۶۹۵**	۰/۴۹۹**	-۰/۴۲۵**	۰/۳۸۲**	۰/۲۱۱**
SQI _{IWA}		-۰/۶۳۶**	۰/۶۰۱**	۰/۴۲۳**	-۰/۴۰۷**	۰/۳۵۲**	۰/۲۰۰**
SQI _{NEM}		-۰/۶۸۲**	۰/۶۸۱**	۰/۴۸۳**	-۰/۴۱۷**	۰/۳۷۳**	۰/۲۰۵**
SQI _{SC}		-۰/۷۰۵**	۰/۷۴۳**	۰/۵۱۶**	۰/۴۶۴**	۰/۴۰۹**	۰/۲۴۸**

**همبستگی معنادار در سطح احتمال ۰/۰۱

چند نکته از بررسی جدول ۶ قابل استنتاج است. اول وجود همبستگی کاملاً معنادار ($p < 0.01$) بین تک شاخص‌های تک‌متغیره با شاخص‌های چندمتغیره مبنادر است، با وجود اینکه در تعیین شاخص‌های اخیر عملاً یک ویژگی خاک منظور شده است. بر مبنای ضرایب تبیین (جدول ۶) در برخی موارد تا ۵۵ درصد تغییرات در شاخص‌های چندمتغیره مبنادر به وسیله شاخص‌های تک‌متغیره قابل توجیه است. این موضوع اهمیت شاخص‌های تک‌متغیره مبنادر را نشان می‌دهد. یعنی می‌توان به جای به کارگیری مجموعه کل داده‌ها (۱۷ ویژگی) برای ارزیابی کیفیت از یک یا دو شاخص تک‌متغیره استفاده کرد و در زمان و هزینه صرفه جویی نمود. اما این سؤال که آیا شاخص‌های تک‌متغیره به علت سهولت به دست آوردن آن‌ها (به ویژه RBD^۱) می‌توانند جایگزینی برای چندمتغیره مبنادر باشند، جای بحث دارد و اعتماد به آن‌ها نیازمند این است که در انواع خاک‌ها از مناطق مختلف در مدیریت‌های متنوع اعتبارسنجی شوند. احتمالاً اگر عوامل و شرایط فیزیکی خاک عامل عمده تعیین کننده کیفیت خاک باشند، پاسخ سؤال مثبت باشد. به هر صورت، این موضوع نیاز به تحقیق بیشتر دارد. همبستگی قوی بین هر یک از شاخص‌های چندمتغیره با S-index جالب است از این نظر که برخی مطالعات اعتبار S-index را به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک زیر سؤال برده‌اند (Van Lier et al., 2014; Moncada et al., 2014).

دومین نکته در جدول ۶ وجود همبستگی منفی قوی ($p < 0.005$) بین شاخص‌های چندمتغیره مبنادر با RBD است که البته مورد انتظار هم بود. همچنان که جلوتر اشاره شد افزایش RBD نشانگر فزونی تراکم خاک است و منجر به بدتر شدن شرایط فیزیکی خاک و کاهش شاخص کیفیت خاک می‌شود. برخی محققان از جمله (Khalifezadeh Koureh et al., 2019) و (Fenton et al., 2017) بر اهمیت آن به عنوان شاخص کیفیت خاک تأکید کرده‌اند و (Moncada et al., 2014) آنرا شاخص فراگیرتر و مطمئن‌تر از S-index دانسته‌اند. سومین نکته همبستگی ضعیف بین شاخص‌های تک‌متغیره و چندمتغیره مبنادر برای MDS در مقایسه با TDS بود. علت روشن نیست و شاید به تفاوت در تعداد نشانگر در محاسبه SQI بر مبنای TDS و MDS مرتبط باشد.

از نظر همبستگی بین دو دسته شاخص تک‌متغیره و چندمتغیره مبنادر با عملکرد گیا گندم، هر یک از سه شاخص تک‌متغیره همبستگی معنادار با عملکرد نشان دادند و LLWR بیشترین همبستگی ($r = 0.516, p < 0.01$) را داشت. همبستگی عملکرد با شاخص‌های چندمتغیره ضعیف و غیرمعنادار بود. در این رابطه یافته‌های متناقض در منابع گزارش شده است. Guo et al. (2017) ضریب همبستگی محصول ذرت با SQI_{NEM} و SQI_{IWA} را ۰/۴۸ تا ۰/۵۷، (Masto et al., 2008) برای گندم و ذرت و (Biswas et al., 2017) و (Biswas et al., 2019) ۰/۷۱ تا ۰/۸۰ برای ذرت و گندم گزارش کرده‌اند. در مقابل در پژوهش‌های دیگر از جمله (Armenise et al., 2013) و (D'Hose et al., 2014) نیز همبستگی ضعیف یا غیرمعنادار بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد محصول (ذرت علوفه‌ای، چغندر علوفه‌ای و کلم خوراکی) مشاهده شده است. دلایل

^۱ Relative bulk density

مختلفی برای این عدم همبستگی اشاره شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. ۱- عملکرد محصول، نتیجه تأثیر انباشته عوامل و متغیرهای مختلف در طول یک فصل رشد است، در حالی که شاخص‌های کیفیت خاک تنها تکیه بر متغیرهای خاک دارد و آن‌ها را کم و بیش ایستا فرض می‌کند. ماهیت پویای ویژگی‌های خاک و برهمکنش آن‌ها با مراحل رشد گیاه می‌تواند منجر به ناهمبستگی شود. ۲- تفاوت در شیوه‌های مدیریت زراعی مانند تناوب، استفاده از کودها، آفت‌کش‌ها، شیوه آبیاری و در کنار این‌ها شرایط محیطی مانند آب و هوا می‌توانند در عملکرد دخیل باشند و آن را کاهش داده یا تقویت کنند در حالی که در تعیین شاخص‌های کیفیت عموماً به حساب نمی‌آیند ولی رابطه و همبستگی بین شاخص‌های کیفیت و عملکرد محصول را پیچیده و دشوار می‌کنند. این موضوع هم نیاز به تحقیق دارد.

نتیجه گیری کلی

شاخص کیفیت خاک چندمتغیره مبنا با انتخاب دو مجموعه داده‌های (نشانگر کیفیت) MDS و TDS و به کارگیری روش‌های مختلف رتبه‌دهی و تلفیق رتبه برای ۱۷۳ مکان (مزرعه گندم) محاسبه شدند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که تعیین شاخص کیفیت بر مبنای مجموعه MDS در مقایسه با TDS با توجه به همبستگی کاملاً معنادار ($p < 0.005$) بین آن دو و نیز به دلیل نیاز به تعداد ویژگی کمتر و صرفه جویی در هزینه و وقت در به دست آوردن داده، به کارگیری MDS می‌تواند از ارجحیت برخوردار باشد. هر سه شاخص تک متغیره مبنا (LLWR و RBD، S-Index) همبستگی قوی و معنادار ($p < 0.01$) با شاخص‌های چندمتغیره مبنا داشتند و علاوه بر این سه شاخص مذکور همبستگی معنادار ($p < 0.05$) با عملکرد گندم نشان دادند و در بین آن‌ها، LLWR بیشترین همبستگی را ($r = 0.55^{**}$) با عملکرد گندم داشت. با این وصف، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های تک متغیره مبنا می‌توانند به عنوان ابزارهای مفیدی برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده شوند، اما نیاز به اعتبارسنجی و بررسی بیشتری دارند تا کاربردپذیری و دقت آن‌ها واضح‌تر مشخص شود. در پژوهش جاری امکان دسترسی به ویژگی‌های زیستی خاک در ۱۷۳ مکان مقدور نشد که می‌تواند در SQI های محاسبه شده به‌ویژه بر مبنای مجموعه TDS تأثیرگذار باشد و از این رو پیشنهاد می‌گردد که در کنار ویژگی‌های موجود، آن‌ها نیز اندازه‌گیری و در تعیین شاخص‌های کیفیت خاک دخالت داده شود. در ارتباط با همبستگی بین شاخص‌های کیفیت و عملکرد گندم آبی فرض ضمنی این بود که عملکرد احیاناً تحت تأثیر تنش کمبود آب ولو به‌طور مقطعی قرار نگرفته است. پیشنهاد می‌شود که درستی این فرض در پژوهش‌های آینده به‌ویژه در منطقه مطالعه شده مورد توجه باشد به‌ویژه اگر هدف از شاخص کیفیت به نوعی ارزیابی عملکرد مد نظر باشد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از خانم دکتر لیلا رضایی و آقای دکتر محمود سیفی که در انجام این پژوهش ما را یاری دادند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم. همچنین، از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز که تأمین کننده هزینه‌های مالی این پژوهش بود، تشکر می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

- Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Mitchell, J.P. (2002a). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90, 25–45.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Cambardella, C.A. (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1945–1962.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, K.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., & Munk, D.S. (2002b). On-farm assessment of soil quality in California's central valley, *Agronomy*, 94, 12–23.
<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2002.0012>
- Anonymous. (1988). *Reconnaissance Soil Survey of Sarab Plain*. Soil and Water Research Institute No. 749, Karaj, Iran. (in Persian with English abstract)
- Anonymous. (1991). *Proceedings of the International Conference on the Assessment and Monitoring of Soil Quality*. Conference Report and Abstracts, Rodale Press, Emmaus, PA, USA.
- Anonymous. (2015). *Science and Research Laboratory for the Soil and Water*. Depaco Corp., Tabriz, Iran.
- Armenise, E., Redmile-Gordon, M.A., Stellacci, A.M., Ciccicarese, A., & Rubino, P. (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.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.013>
- Askari, M.S., & Holden, N.M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230, 131–142.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>
- Banaie, M.H. (1998). The Map of Soil Moisture and Temperature Regimes of Iran. *Soil and Water Research Institute*, Karaj, Iran. (in Persian with English abstract).
- Bastida, F., Jose Luis, M., Teresa, H., & Carlos, G. (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 3463–3473.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.06.001>
- Biswas, J.C., Kalra, N., Maniruzzaman, M., Naher, U.A., & Haque M.M. (2019). Soil health assessment methods and relationship with wheat yield. *Open Journal of Soil Science*, 9, 189–205.
<http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2019.99011>
- Biswas, S., Hazra, G.C., Purakayastha, T.J., Saha, N., Mitran, B., Roy, S.S., Basak, N & Mandal, B. (2017). Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma*, 292, 34–48.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.003>
- Brejda, J.J., Karlen, D.L., Smith, J.L., & Allan, D.L. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators in Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 2125–2135.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462125x>
- Carlson, C.G., Gelderman, R., Clay, D.E., & Reitsma, K.D. (2019). Managing saline and sodic soils for wheat production. Pp.165-172. In: Carlson, C.G., Gelderman, R., Clay, D.E., & Reitsma, K.D. (eds). *Best Management Practices*. South Dakota State University Extension, South Dakota, USA.

- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E.P., Franco, A.L.C., Tormena, C.A., Davies, C.A., & Cerri, C.C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLOS One*, 1–26.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Damiba, W.A.F., Gathenya, J.M., Raude, J.M., & Home, P.J. (2024). Soil quality index (SQI) for evaluating the sustainability status of Kakia-Esamburmbur catchment under three different land use types in Narok County, Kenya, *Heliyon*, 10, 1–24.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25611>
- da Silva, A.P., & Kay, B.D. (1997). Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of American Journal*, 61(3), 877–883.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030023x>
- da Silva, A.P., Kay, B.D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58(6), 1775–1781.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- D'Hose, T., Cougnon, M., Vlieghe, A.D., Vandecasteele, B., Viaene, N., Cornelis, W., Bockstaele, E.W. & Reheul, D. (2014). The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Applied Soil Ecology*, 75, 189–198.
<http://dx.doi.org/10.1080/1065657X.2012.10737022>
- Dexter, A.R., (2004a). Soil physical quality; Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth, *Geoderma*, 120, 201–214.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>
- Ditzler, C.A., & Tugel, A.J., (2002). Soil quality field tools of USDA-NRCS soil quality institute. *Agronomy Journal*, 94, 33–38.
<https://doi.org/10.2134/agronj2002.3300>
- Doran, J.W., & Jones, A.J. (1996). Methods for assessing soil quality. *Soil Science Society of America*, SSSA Special Publication No 49, Madison, WI, USA.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238\(97\)00090-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4238(97)00090-3)
- Doran, J.W., & Parkin, B.T. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., and Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F., & Stewart, B.A. (Eds). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America, Special publication No 35, Madison, Wisconsin, USA.
- Faiziasl, V., Valizadeh, G.h., Toshih, V., Ashraftalei, A., & Bliss, V. (2003). Determining critical levels of micronutrients for dryland wheat in the Northwest of Iran. *Journal of Agricultural Sciences of Iran*, 5(4), 236–249. (in Persian with English abstract).
- Fenton, O., Vero, S., Schulte, R.P.O., O'Sullivan, L., Bondi, G., & Creamer, R.E. (2017). Application of Dexter's soil physical quality index: an Irish case study. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 56, 45–53.
<http://dx.doi.org/10.1515/ijafr-2017-0005>
- Glover, J.N., Reganold, J.P., & Andrews, P.K. (2000). Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 80(1-2), 29–45.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00131-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00131-6)
- Guo, L.L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D., & Li, F. (2017). A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River, *Catena*, 152, 135–143.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.015>
- Hosseinpour, A. (2008). *Soil Chemistry and Fertility*. Payam Noor University of Tehran, (Publication no 1), 234 Pages. (in Persian with English abstract).
- Jolliffe, I.T. (1986). *Principle component analysis*. Springer-Verlag.

- Jones, C.A. (1983). Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 1208–1211.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1983.03615995004700060029X>
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. & Schuman, G.E. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Scienc Society of America Journal*, 61, 4–10.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Karlen, D.L., & Stott, D.E. (1994). A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 35, 53–72.
<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c4>
- Karlen, D.L., Gardner, J.C. & Rosek, M.J. (1998). A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture*, 11, 56–60.
<https://doi.org/10.2134/jpa1998.0056>
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Doran, J.W., & Wienhold, B.J. (2003). Soil quality: human kind's foundation for survival. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58, 171–179.
<https://doi.org/10.1080/00224561.2003.12457524>
- Khalifezadeh Koureh, H., Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., & Khodaverdiloo, H. (2019). Critical values of soil physical quality indicators based on vegetative growth characteristics of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 493–506.
<http://dx.doi.org/10.1007/s42729-019-00134-8>
- Larson, W.E., & Pierce, F.J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. Evaluation of sustainable land management in the developing world. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management.
- Marzaioli, R., D'Ascoli, R., De Pascale, R.A., & Rutigliano, F.A. (2010). Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use type. *Applied Soil Ecology*, 44, 205–212.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.12.007>
- Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., & Patra, A.K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3), 419–435.
<https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z>
- Moncada, M.P., Ball, B.C., Gabriels, D., Lobo, D., & Cornelis, W.M. (2014). Evaluation of soil physical quality index for some tropical and temperate medium-textured soils. *Soil Science Society America Journal*, 79, 9–19.
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0259>
- Moody, P. (2006). Understanding soil pH, *Natural Resource Sciences*, Pp, 1-2.
<http://dx.doi.org/10.9734/ijpss/2019/v31i230208>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). Comparison of soil quality index using three methods. *PLOS ONE*, 9(8), 1–15.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>
- Mulyono, A., Harryanto, R., Suriadikusumah, A., & Djuwansah, M. (2019). Soil quality under agroforestry trees pattern in upper citarum watershed, Indonesia. *Ecological Engineering*, 20, 203–213.
<https://doi.org/10.12911/22998993/93942>
- Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Moradiana, S.h. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan province, Iran. *Ecological Indicators Journal*, 83, 482–494.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001>

- Ortega, R.A., & Santibanez, O.A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58, 49–59.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.011>
- Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B., & Meyer, R.E. (1992). Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7, 5–11.
<https://doi.org/10.1017/S0889189300004367>
- 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, 325–334.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
- Qian, F., Yu, Y., Dong, X., & Gu, H. (2023). Soil quality evaluation based on a minimum data set (MDS)-A case study of ieling County, northeast China. *Land Journal*, 12, 1–16.
<https://doi.org/10.3390/land12061263>
- Qin, M.Z., & Zhao, J. (2000). Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *Acta Geographica Sinica*, 55, 545–554. (In Chinese with English abstract).
<https://doi.org/10.11821/xb200005004>
- Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Hossein, A.B., Fereidouni, Z., & Rahimi Bandari, S. (2014). Assesment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin province, Iran. *Ecological Indicators Journal*, 40, 19–26.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>
- Ranjbar, G. (2015). Optimal agronomic management for wheat production under saline conditions. *Agricultural Research, Education and Extension Organization*, Agricultural Education Publication, Karaj, Iran (in Persian with English abstract).
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., & Saxton, K.E. (1982). Estimation of soil water properties. *American Journal of Agricultural Engineering*, 25(5), 1316–1328.
<https://doi.org/10.13031/2013.33720>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., & Ton, C.F. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146, 466–474.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Rezaee, A. (1996). Evaluation of the use of soil particle size distribution parameters (mean diameter and geometric standard deviation) in determining the characteristic curve of soil water and hydraulic conductivity, Iran. M.Sc. Thesis, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian with English abstract).
- Rezaee, L., Moosavi, A.A., Davatgar, N., & Sepaskhah, A.R. (2020). Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators Journal*, 117(106566), 1–12.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020EcInd.11706566R/doi:10.1016/j.ecolind.2020.106566
- Saleh, A.A., Elsharkawy, M.M., Abdelrahman, M.A.E., & Arafat, S.M. (2021). Evaluation of soil quality in arid western fringes of the Nile Delta for sustainable agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2021(1434692), 1–17.
<http://dx.doi.org/10.1155/2021/1434692>
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L., & Rogers, H.H. (2016). Quantification of soil quality. Chapter 27, Pp. 387–404. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., & Stewart, B.A. (Eds) *Soil processes and the carbon cycle*. Volume 11 of Advances in Soil Science, CRC Press.
- Shah, T.I., Shah, A.M., Bangroo, Sh.A, Sharma, M.P., Aezum, A.M., Kirmani, N.A., Lone, A.H., Jeelani, M.I., Rai, A.P., Wani, F.J., Bhat MI, Malik, A.R., Biswas, A., & Ahmad, L., 2022. Soil

quality index as affected by integrated nutrient management in the Himalayan foothills. *Agronomy*, 12(1870), 1–16.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12081870>

Shahbazi, K., & Besharati, H. (2013). Overview of agricultural soil fertility status of Iran. *Journal of Land Management*, 1(1), 1–15. (in Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22092/1mj.2013.100072>

Shakouri, Katigeri. M., Soltani, S.H., Karbalai Aghamolki, M.T., & Keshtekar Talemi, F., (2019). Relationship between yield and a soil quality index in paddy fields. *Journal of Soil Research*, 33, 197–212. (in Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22092/ijsr.2019.124411.415>

Shukla, M.K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research*, 87, 194–204.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>

Sinha, S.h., 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, 1824–1832.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.022>

Sun, B., Zhou, S., & Zhao, Q. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115, 85–99.

[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00078-8)

Vadivel, A., & Shivana, M., (2020). Analytical Techniques in Soil, Plant, Fertilizer and Water. *Soil and Plant Analysis*, Punjabi University, Patiala, Punjab, India.

Van Genuchten, M.T.h. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44, 892–898.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Van Genuchten, M.T.h., Leij, F.J., & Yates, S.R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. United states Environmental Protection Agency. Rep. 600/2-91/065. Research Laboratory Ada Oklahoma, USA.

Van Lier, Q.d.J., Bras, R., & Solo, Ci. (2014). Revisiting the S-Index for soil physical quality and its use in Brazile. *Brazilian Journal of Soil Science*, 38, 1-10.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100001>

Weil, R.R., & Brady, N.C. (2017). *The nature and properties of soils*. Fiften Edition, Pearson Education Co., Virginia, USA.

Wienhold, B.J., Karlen, D.L., Andrews, S.S., & Stott, D.E. (2009). Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(4), 260–266.

[DOI: 10.1017/S1742170509990093](https://doi.org/10.1017/S1742170509990093)

Wymore, A.W. (1993). *Model-based systems engineering*. CRC Press, Boca Raton.

<https://doi.org/10.1201/9780203746936>