

Evaluation of Soil Quality Index in the Presence of Sugarcane Bagasse Hydrochar Using Shannon Entropy Combination and Principal Component Analysis

Laleh Divband Hafshejani^{1*} , Mohammad Mirnaseri² and Abd Ali Naseri³

(Received: September 29-2025 ; Revised: November 29-2025 ; Accepted: December 2-2025)

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
 2. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.
 3. Department of Irrigation and drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
- *: Corresponding author Email: [l.divband @scu.ac.ir](mailto:l.divband@scu.ac.ir)

Abstract

Soil, as one of the vital natural resources, plays a fundamental role in ecosystem sustainability and global food security; however, degradation caused by unsustainable management, intensive agriculture, and pollution threatens its capacity. The use of organic amendments such as hydrochar is considered an innovative approach to improve soil physicochemical properties and enhance the Soil Quality Index (SQI). This study aimed to investigate the effects of different levels of hydrochar on soil properties and evaluate SQI. The treatments included control and three hydrochar levels (H10, H20, and H50). Soil properties such as pH, porosity, bulk density, electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen, and available phosphorus were measured and normalized, and parameter weighting was conducted using entropy and principal component analysis (PCA). Results showed that nitrogen and organic carbon had the greatest importance in soil quality. The H50 treatment recorded the highest SQI (0.815), significantly greater than other treatments, while H20 (0.546) and H10 (0.336) also showed positive effects compared to the control (0.159). Hydrochar application improved organic carbon, nitrogen, and phosphorus and reduced bulk density. Although an increase in electrical conductivity was observed in H50. Overall, hydrochar application had a positive and gradual effect on SQI, with H20 recommended as an optimal level to improve fertility and reduce long-term salinity risks.

Keywords: Soil, Hydrochar, Soil Quality Index (SQI), Entropy, Principal Component Analysis (PCA)

How to cite this article: Divband Hafshejani, L., Mirnaseri, M., and Naseri, A.A. 2025. Evaluation of Soil Quality Index in the Presence of Sugarcane Bagasse Hydrochar Using Shannon Entropy Combination and Principal Component Analysis. *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 177-187. DOI: [10.47176/jwss.29.4.72331](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.72331)

Copyright © 2025 Divband Hafshejani et al. Published by Isfahan University of Technology.



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

ارزیابی شاخص کیفیت خاک در حضور هیدروچار باگاس نیشکر با استفاده از ترکیب آنтроپی شانون و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

لاله دیوبند هفشجانی^{۱*}، محمد میرناصری^۲ و عبدعلی ناصری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۱)

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران.

۳. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: l.divband@scu.ac.ir

چکیده

خاک به‌عنوان یکی از منابع حیاتی طبیعی، نقشی اساسی در پایداری اکوسیستم‌ها و امنیت غذایی جهانی دارد. اما تخریب ناشی از مدیریت ناپایدار، کشاورزی فشرده و آلودگی ظرفیت آن را تهدید می‌کند. استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند هیدروچار رویکردی نوین برای بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک و ارتقای شاخص کیفیت خاک (SQI) است. این پژوهش با هدف بررسی اثر سطوح مختلف هیدروچار بر ویژگی‌های خاک و ارزیابی SQI انجام شد. تیمارها شامل شاهد و سه سطح هیدروچار (H50، H10 و H20) بودند. ویژگی‌های pH، تخلخل، چگالی ظاهری، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل و فسفر قابل‌استفاده اندازه‌گیری و پس از نرمال‌سازی با روش‌های آنтроپی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد نیتروژن و کربن آلی بیشترین اهمیت را در کیفیت خاک دارند. تیمار H50 بالاترین SQI (۰/۸۱۵) را به‌طور معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها داشت؛ درحالی‌که H20 (۰/۵۴۶) و H10 (۰/۳۳۶) نیز نسبت به شاهد (۰/۱۵۹) اثر مثبت داشتند. بهبود کربن آلی، نیتروژن و فسفر و کاهش چگالی ظاهری از مهم‌ترین اثرهای هیدروچار بود؛ هرچند افزایش هدایت الکتریکی در H50 دیده شد. در مجموع، کاربرد هیدروچار اثر مثبت و تدریجی بر SQI دارد و سطح H20 می‌تواند به‌عنوان گزینه بهینه برای ارتقای حاصلخیزی و کاهش خطر شوری پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: خاک، هیدروچار، شاخص کیفیت خاک (SQI)، آنтроپی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

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

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

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



مقدمه

خاک یک منبع طبیعی اساسی است که زیربنای سلامت اکوسیستم، پایداری کشاورزی و تولید غذا در سراسر جهان است. خاک‌های سالم مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی، از جمله چرخه مواد مغذی، تنظیم آب، ترسیب کربن و پشتیبانی از تنوع زیستی را ارائه می‌دهند که همگی برای حفظ اکوسیستم‌های مقاوم و تضمین امنیت غذایی بلندمدت حیاتی هستند (۲۳، ۳۷ و ۳۸). با این حال، تخریب خاک (ناشی از کشاورزی فشرده، فرسایش، آلودگی و مدیریت ناپایدار) این خدمات و ظرفیت خاک‌ها را برای حمایت از نسل‌های آینده تهدید می‌کند (۳۰ و ۳۸). نشان داده شده است که شیوه‌های مدیریت پایدار خاک مانند کشاورزی حفاظتی، اصلاح‌کننده‌های آلی، تناوب زراعی و کوددهی متعادل، سلامت خاک را بازیابی و تقویت می‌کنند، عملکرد محصول را بهبود می‌بخشند و آثار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند (۲۷ و ۳۵). ادغام سلامت خاک در سیاست‌ها و رویه‌های کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای برای دستیابی به اهداف پایداری جهانی حیاتی شناخته می‌شود (۴ و ۵).

کاربرد هیدروچار باعث افزایش خواص فیزیکوشیمیایی خاک، از جمله افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود حفظ مواد مغذی و کاهش جرم مخصوص ظاهری، به‌ویژه در خاک‌های شنی و رسی می‌شود (۱۷، ۲۰ و ۳۴). این ماده می‌تواند به عنوان یک کود با رهایش آهسته عمل کند و مواد مغذی ضروری و ریزمغذی‌ها را برای گیاهان فراهم کند و اغلب pH خاک را افزایش می‌دهد که برای خاک‌های اسیدی مفید است (۳۴). هیدروچار همچنین باعث تجمع خاک و فعالیت میکروبی می‌شود که می‌تواند حاصلخیزی خاک و رشد گیاه را بیشتر بهبود بخشد (۳۷). مزایای هیدروچار به نوع ماده اولیه، دمای تولید و میزان کاربرد بستگی دارد. نرخ‌های بیشتر کاربرد عموماً خواص خاک را بهبود می‌بخشند؛ اما ممکن است همیشه رشد گیاه را افزایش ندهند و در صورت مصرف بیش از حد، می‌توانند خطر شسته شدن مواد مغذی را به همراه داشته باشند

(۱۳ و ۳۴). برخی از هیدروچارها ممکن است حاوی ترکیبات فیتوتوکسیک باشند؛ اما این ترکیبات اغلب با کمپوست شدن یا کهنه شدن کاهش می‌یابند (۷). هیدروچار همچنین می‌تواند جوامع میکروبی خاک و دینامیک کربن را تغییر دهد و بخش‌های کربن آلی پایدار را افزایش دهد (۳۲). با توجه به اثرهای مختلف هیدروچار بر پارامترهای خاک و اینکه بیشتر مطالعات قبلی بر پارامترهای مجزای خاک متمرکز بوده‌اند که منجر به عدم قطعیت تفسیری به دلیل تغییرات در واحدها، تنوع پارامترها و روندهای متناقض احتمالی شده است.

برای غلبه بر این چالش‌های تحلیلی، شاخص‌های کیفیت خاک یکپارچه (SQI) برای تجمیع مجموعه‌داده‌های متنوع در یک معیار کمی واحد معرفی شده‌اند که ارزیابی جامع و مقایسه شرایط خاک و اثرهای عملیات را تسهیل می‌کند. شاخص‌های کیفیت خاک معمولاً با استفاده از یک مجموعه‌داده کل از تمام ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده یا یک مجموعه‌داده حداقلی که از طریق روش‌های آماری مانند تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یا تجزیه و تحلیل شبکه انتخاب می‌شوند، ساخته می‌شوند (۱۰، ۳۱ و ۳۹). سیستم‌های امتیازدهی رایج شامل توابع خطی و غیرخطی هستند که از مدل‌های افزایشی، افزایشی وزنی و شاخص نمورو برای ادغام شاخص‌ها استفاده می‌شود. شاخص‌های کیفیت خاک رویکردهای کاهش ابعاد پیچیدگی و هزینه را کاهش می‌دهند و در عین حال دقت را حفظ می‌کنند (۲۵ و ۲۸).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل جامع اثر سطوح مختلف هیدروچار حاصل از باگاس نیشکر بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کیفیت خاک طراحی شد. در این راستا، شاخص کیفیت خاک (SQI) به عنوان یک معیار یکپارچه و کمی برای ارزیابی تغییرات ناشی از تیمارهای مختلف به کار گرفته شد. به‌منظور افزایش دقت در وزن‌دهی پارامترهای مؤثر بر کیفیت خاک و کاهش خطاهای احتمالی ناشی از تنوع داده‌ها، دو رویکرد آماری پیشرفته شامل تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و روش آنترابی شانون مورد استفاده قرار گرفت. این

پارامترهایی که مقادیر بیشتر آنها نشان‌دهنده کیفیت بهتر خاک است

برای پارامترهایی مانند تخلخل، کربن آلی، نیتروژن کل و فسفر موجود (۲۴)، از فرمول نرمال‌سازی خطی (معادله ۱) استفاده شد:

$$S_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

که در آن S_i : امتیاز نرمال‌سازی شده برای نمونه i ، X_i : مقدار مشاهده شده پارامتر برای نمونه i ، $X_{\min}$: کمترین مقدار مشاهده شده پارامتر و $X_{\max}$: بیشترین مقدار مشاهده شده پارامتر است. بر اساس معادله ۱ بیشترین مقدار، امتیاز ۱ و کمترین مقدار، امتیاز ۰ را دریافت می‌کند.

پارامترهایی که مقادیر کمتر آنها نشان‌دهنده کیفیت بهتر خاک است

برای ویژگی‌هایی مانند EC و BD (۳۳) که مقادیر کمتر ارجحیت دارند، از فرمول نرمال‌سازی معکوس (معادله ۲) استفاده شد:

$$S_i = \frac{X_i - X_{\max}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

متغیرها مطابق معادله ۱ تعریف می‌شوند. در اینجا، کمترین مقدار ۱ و بیشترین مقدار ۰ است.

پارامتر با محدوده بهینه (pH)

از آنجایی که pH خاک در محدوده خاصی (۶/۵-۷/۵) بهینه است، از یک تابع گاوسی برای نرمال‌سازی مقادیر pH استفاده شد (معادله ۳) و بیشترین امتیاز به مقدار بهینه (۷/۰) و امتیازهای کمتر به مقادیری که از این مقدار بهینه منحرف می‌شوند، اختصاص داده شد.

$$S_i = e^{-\frac{(X_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

که در آن: S_i : امتیاز نرمال‌سازی شده برای pH نمونه i ، X_i : مقدار pH مشاهده شده، $\mu=7/0$: مقدار pH بهینه (میانگین محدوده بهینه):

دو روش با فراهم‌سازی امکان شناسایی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر و اختصاص وزن مناسب به آنها، شرایط لازم را برای محاسبه دقیق‌تر شاخص کیفیت خاک فراهم ساختند. افزون بر این، یکی دیگر از اهداف اصلی پژوهش، تعیین سطح بهینه کاربرد هیدروچار بود؛ سطحی که علاوه بر بهبود ویژگی‌های کلیدی خاک از قبیل کربن آلی، نیتروژن و فسفر، بتواند حاصلخیزی و پایداری بلندمدت خاک را تضمین کرده و در عین حال از بروز پیامدهای منفی احتمالی مانند افزایش بیش از حد شوری جلوگیری کند. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر نقش هیدروچار به عنوان یک اصلاح‌کننده آلی پایدار کمک کرده و مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و کشاورزی در راستای ارتقای سلامت و پایداری خاک فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منبع داده‌ها

مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی گزارش شده در پژوهش‌های پیشین استخراج شده است (۱۶). این مجموعه شامل اندازه‌گیری هفت ویژگی اساسی خاک تحت تیمارهای مختلف اصلاحی است: یک نمونه شاهد (بدون اصلاح)، هیدروچار اعمال شده با نرخ‌های H10، H20 و H50. هر تیمار در سه تکرار انجام شد و میانگین مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک برای تجزیه و تحلیل بعدی استفاده شد. ویژگی‌های خاک ارزیابی شده شامل pH، تخلخل، چگالی ظاهری، رسانایی الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل و فسفر موجود بود.

نرمال‌سازی داده‌ها

برای امکان‌پذیر کردن مقایسه مداوم کیفیت خاک در بین تیمارها و پارامترهای مختلف با واحدهای متغیر، تمام داده‌های خام در مقیاسی از ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند. سه روش نرمال‌سازی بر اساس ماهیت هر ویژگی خاک اعمال شد.

۶/۵-۷/۵ و $\sigma=0.5$: انحراف معیار (نصف عرض محدوده بهینه)، برای تنظیم حساسیت تابع استفاده شد. بر اساس این معادله، نمونه‌هایی با مقادیر pH نزدیک به ۷/۰ امتیاز نزدیک به ۱ دریافت می‌کنند؛ درحالی‌که نمونه‌هایی با مقادیر دورتر از محدوده بهینه امتیازهای کمتری دریافت می‌کنند.

محاسبه وزن پارامترهای شاخص کیفیت خاک اصلاح شده

وزن‌دهی به پارامترهای تشکیل‌دهنده شاخص کیفیت در پژوهش حاضر بر اساس دو روش آنتروپی، تحلیل مؤلفه‌های اساسی است. روش وزن‌دهی آنتروپی سهم هر پارامتر خاک را بر اساس تغییرپذیری ذاتی آن در میان تیمارها ارزیابی می‌کند. وزن آنتروپی هر پارامتر به صورت زیر محاسبه شد: ماتریس تناسب (معادله ۴):

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{i=1}^m S_{ij}} \quad (4)$$

که در آن P_{ij} نسبت پارامتر j ام در تیمار i ام، S_{ij} مقدار نرمال شده و m تعداد کل تیمارها است. مقدار آنتروپی هر شاخص (معادله ۵):

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

که در آن e_j نشان‌دهنده آنتروپی پارامتر j است.

وزن آنتروپی (معادله ۶):

$$W_{j(Ant)} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (6)$$

که در آن $W_{j(Ant)}$ وزن آنتروپی اختصاص داده شده به پارامتر j و n تعداد پارامترهاست.

این روش با اختصاص وزن به پارامترهای خاک بر اساس تغییرپذیری (آنتروپی)، اطمینان حاصل می‌کند که پارامترهایی با تغییرات بیشتر و در نتیجه سهم اطلاعاتی بیشتر، وزن بیشتری دریافت کنند. بدین ترتیب، ارزیابی کیفیت خاک میان تیمارهای مختلف به صورت عینی تر و حساس تر انجام می‌گیرد.

در روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی سهم هر پارامتر خاک در تشکیل شاخص کیفیت خاک بر اساس واریانس توضیح داده شده توسط مؤلفه‌های اصلی سنجیده می‌شود. مراحل محاسبه وزن هر پارامتر به صورت زیر است.

استانداردسازی داده‌ها (معادله ۷):

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (7)$$

که در آن X_{ij} مقدار پارامتر j در مشاهده i ، μ_j میانگین پارامتر j و σ_j انحراف پارامتر j است.

ماتریس همبستگی (معادله ۸):

$$Z_{ij} = \frac{1}{n-1} Z^T Z \quad (8)$$

که در آن Z ماتریس داده‌های استاندارد شده است.

تجزیه مقادیر ویژه (معادله ۹):

$$Rv_k = \lambda_k v_k \quad (9)$$

که در آن λ_k مقادیر ویژه مؤلفه k و v_k بردار ویژه (بارهای عاملی) است.

وزن‌های اولیه (معادله ۱۰):

$$w_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |v_{jk}| \quad (10)$$

که در آن w_j وزن اختصاص داده شده به پارامتر j ، m تعداد مؤلفه‌های معنی دار و v_{jk} بار عاملی پارامتر j در مؤلفه k است.

نرمال‌سازی وزن‌ها (معادله ۱۱):

$$w_{j(PCA)}^{norm} = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^p w_j} \quad (11)$$

که در آن $w_{j(PCA)}^{norm}$ وزن تحلیل مؤلفه‌های اساسی اختصاص داده شده به پارامتر j است.

وزن نهایی هر پارامتر (معادله ۱۲):

$$W_{Total} = \frac{W_{j(Ant)} + w_{j(PCA)}^{norm}}{2} \quad (12)$$

که در آن W_{Total} وزن نهایی اختصاص داده شده به هر پارامتر برای محاسبه شاخص کیفیت خاک است.

شاخص کیفیت خاک (معادله ۱۳):

$$SQI = \sum_{i=1}^n S_i W_{Total} \quad (13)$$

تجزیه و تحلیل آماری

برای ارزیابی تفاوت‌ها در کیفیت خاک بین تیمارها، تجزیه و تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) روی مقادیر SQI با سه تکرار در هر تیمار انجام شد. قبل از آنالیز واریانس، فرضیات نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها به ترتیب با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک ($p > 0.05$) و آزمون لون ($p > 0.05$) بررسی شدند. فرض صفر (H_0) بیانگر عدم وجود تفاوت معنادار در میانگین SQI تیمارها بود. در صورت معنادار شدن نتایج ($p < 0.05$)، از آزمون چنددامنه‌ای توکی (Tukey's HSD) برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. کلیه تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و در سطح خطای $\alpha = 0.05$ انجام شد.

نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، هفت ویژگی کلیدی فیزیکی و شیمیایی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک انتخاب شدند، از جمله تخلخل، pH، فسفر، نیتروژن، هدایت الکتریکی، چگالی ظاهری و کربن آلی. انتخاب این پارامترها بر اساس ارتباط مستقیم آنها با فرایندهای بیوشیمیایی و نقش محوری آنها در پایداری سیستم‌های کشاورزی بود.

اهمیت این پارامترها در مطالعات قبلی نیز مورد تأکید قرار گرفته است. برای نمونه، دالوز و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای که روی خاک‌های گرمسیری انجام داد، pH، فسفر، پتاسیم، چگالی ظاهری و کربن آلی را به عنوان شاخص‌های کلیدی کیفیت خاک شناسایی کرد که با چهار پارامتر مورد استفاده در پژوهش حاضر همپوشانی دارد (۱۱). به طور مشابه، در مطالعه نبی‌اللهی و همکاران (۲۰۱۷) برای خاک‌های شور در زمین‌های کشاورزی استان کردستان، از متغیرهایی مانند هدایت الکتریکی، کربن آلی، چگالی ظاهری، ظرفیت تبادل کاتیونی و pH به همراه سایر شاخص‌های مرتبط با سدیم، برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده شد (۲۶).

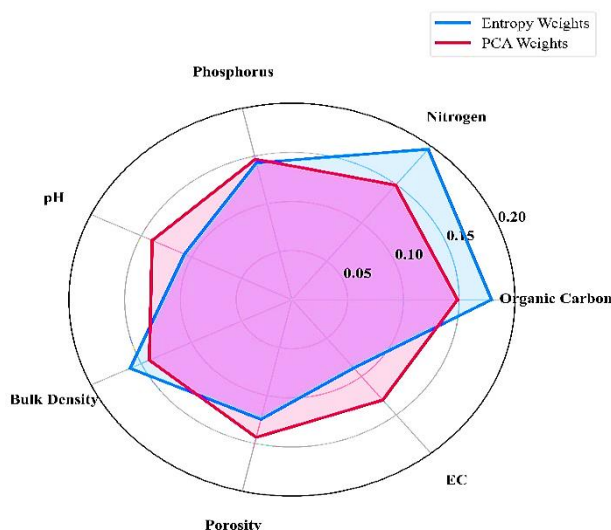
وزن‌دهی پارامترها با دو روش آنالیز و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام شد (شکل ۱). نتایج نشان داد که بیشترین

وزن در هر دو روش به نیتروژن اختصاص یافته است؛ به‌طوری که این عامل نقش کلیدی در تغییرات کیفیت خاک تحت تیمار هیدروچار دارد (۳). پس از نیتروژن، کربن آلی بیشترین سهم را به خود اختصاص داد که بیانگر اهمیت زیاد این عامل در بهبود حاصلخیزی و پایداری خاک است (۷). فسفر نیز وزنی در حد متوسط داشت و اثر آن بر شاخص کیفیت خاک کمتر از نیتروژن و کربن آلی بود. در مقابل، پارامترهایی مانند pH و جرم مخصوص ظاهری دارای وزن نسبتاً کمی بودند که نشان می‌دهد تغییرات آنها اثر کمتری بر شاخص نهایی داشته است. همچنین کمترین وزن مربوط به هدایت الکتریکی (EC) و تخلخل بود که حاکی از نقش محدود این عوامل در تغییر کیفیت خاک تیمار شده با هیدروچار است (۱۲ و ۱۴).

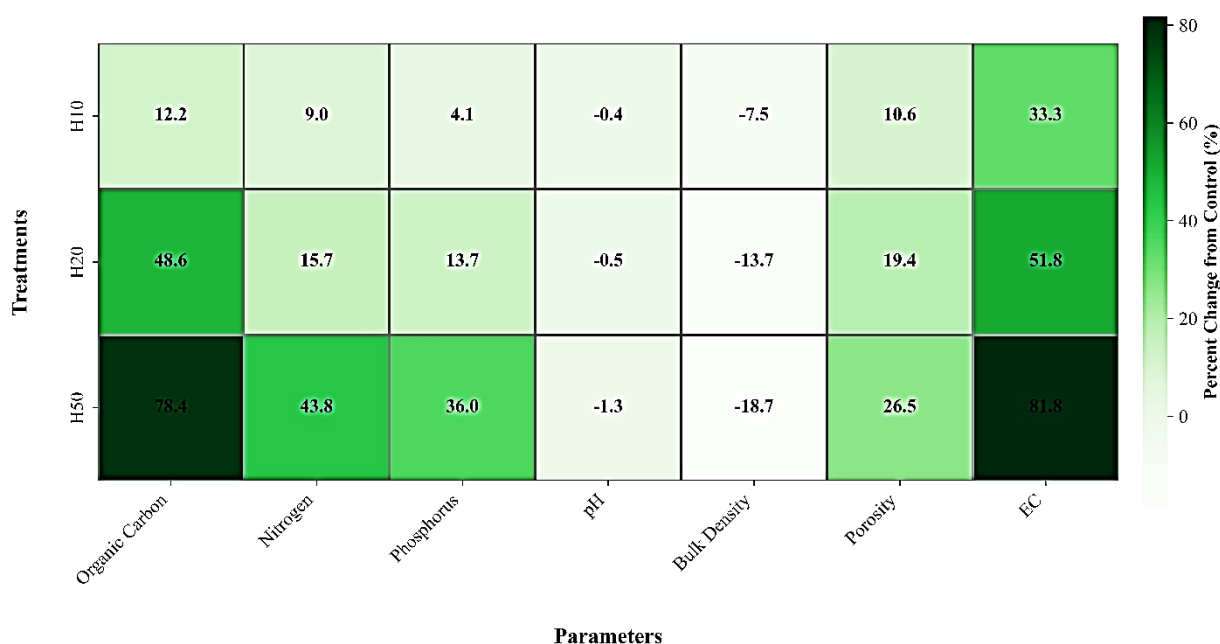
به‌طور کلی، مقایسه دو روش آنالیز و PCA نشان داد که اگرچه مقادیر وزنی اندکی تفاوت داشتند، اما هر دو روش در شناسایی نیتروژن و کربن آلی به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر کیفیت خاک همسو بودند. این نتایج تأکید می‌کند که در ارزیابی اثرهای کاربرد هیدروچار، تمرکز بر تغییرات نیتروژن و کربن آلی می‌تواند شاخص مناسبی از بهبود کیفیت خاک ارائه دهد (۱۸ و ۳۷).

تأثیر هیدروچار بر پارامترهای شاخص کیفیت خاک

شکل ۲ نقشه حرارتی درصد تغییرات ویژگی‌های خاک پس از کاربرد سطوح مختلف هیدروچار (H_{50} ، H_{20} ، H_{10}) نسبت به تیمار شاهد را ارائه می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که استفاده از هیدروچار تأثیر قابل توجهی بر بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک داشته است. مقدار کربن آلی خاک در تمامی تیمارهای هیدروچار افزایش قابل توجهی داشته است. در تیمار H_{10} میزان تغییر برابر با ۱۲/۲ درصد، در H_{20} برابر با ۴۸/۶ درصد و در H_{50} برابر با ۷۸/۴ درصد گزارش شد. این روند نشان‌دهنده ورود مواد آلی پایدار از طریق هیدروچار به خاک و نقش مهم آن در افزایش حاصلخیزی است؛ همانطور که توسط سان و همکاران (۲۰۲۰) و چنگ و همکاران (۲۰۲۳)



شکل ۱. وزن پارامترهای تشکیل دهنده شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش آنالیز شانون و تحلیل مؤلفه‌های اساسی



شکل ۲. نقشه حرارتی درصد تغییرات ویژگی‌های خاک پس از کاربرد سطوح مختلف هیدروچار نسبت به تیمار شاهد

نیز گزارش شده است (۹ و ۳۲). این یافته با مطالعات قبلی در مورد قرار گرفتن خاک در معرض هیدروچار از لجن فاضلاب و ضایعات روغن زیتون (۲۱)، نی و کاه ذرت، کود گاوی (۲۲) و لجن فعال (۳۶) همسو بود.

همچنین مقدار نیتروژن با مصرف بیوچار افزایش یافت که نشان‌دهنده توان هیدروچار در غنی‌سازی خاک ازت و بهبود

چرخه نیتروژن است. افزایش نیتروژن در H10، H20 و H50 به ترتیب ۹، ۱۵/۷ و ۴۳/۸ درصد بود. نتایج مشابه با نتایج پژوهش حاضر در خاک‌های تیمار شده با انواع دیگر هیدروچارها نیز دیده شد (۱۲ و ۳۶). فسفر خاک تحت تأثیر هیدروچار افزایش قابل توجهی نشان داد. مقادیر تغییر در تیمارهای H10، H20 و H50 به ترتیب ۴/۱، ۱۳/۷ و ۳۶ درصد بود. این افزایش

می‌تواند ناشی از آزادسازی فسفر از ساختار هیدروچار یا بهبود قابلیت دسترسی فسفر در خاک باشد.

از نظر واکنش خاک، pH در تیمار شاهد مقدار بیشتری داشت که با افزایش میزان هیدروچار کاهش یافته و در تیمار، این تغییر نشان می‌دهد که هیدروچار خاصیت تعدیل‌کنندگی pH دارد و می‌تواند در اصلاح خاک‌های قلیایی مؤثر واقع شود. گفتنی است که pH خاک در این مطالعه در محدوده مناسب برای رشد بیشتر گیاهان باقی ماند (۱۵).

در ارتباط با ویژگی‌های فیزیکی، نتایج نشان‌دهنده کاهش چشمگیر چگالی ظاهری بود. میزان کاهش در H10 برابر ۷/۵ درصد، در H20 برابر ۱۳/۷ درصد و در H50 برابر ۱۸/۷ درصد بود که می‌تواند ناشی از تغییر در ساختار و تراکم خاک تحت تأثیر ذرات هیدروچار باشد. تخلخل خاک در اثر کاربرد هیدروچار افزایش یافت. درصد تغییر در H10، H20 و H50 به ترتیب ۱۰/۶، ۱۹/۴ و ۲۶/۵ درصد بود. افزایش میزان تخلخل نیز بیانگر بهبود تهویه و ظرفیت نگهداری آب در خاک است. کاهش چگالی ظاهری خاک پس از افزودن هیدروچار ممکن است به دو دلیل باشد: (۱) چگالی ظاهری هیدروچار به دلیل ساختار متخلخل آن کمتر از خاک است؛ بنابراین، با کاربرد آن، به‌ویژه در مقادیر زیاد، چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد (۱۲) و (۲) هیدروچار با تأثیر بر خاکدانه‌سازی، ایجاد منافذ درشت در خاک و بهبود ساختار خاک، چگالی ظاهری آن را کاهش می‌دهد (۱). هدایت الکتریکی در تمامی تیمارها افزایش چشمگیری نشان داد. در تیمار H10 مقدار آن ۳۳/۳ درصد و در H20 مقدار ۵۱/۸ درصد و در H50 مقدار ۸۱/۸ درصد بود. این امر نشان‌دهنده افزایش غلظت املاح محلول در خاک به دلیل ورود ترکیبات معدنی همراه با هیدروچار است. اگرچه این افزایش در کوتاه‌مدت می‌تواند تغذیه گیاه را بهبود دهد، اما در بلندمدت احتمال تجمع شوری و بروز مشکلات ناشی از آن وجود دارد. این یافته با مطالعات قبلی که افزایش هدایت الکتریکی را پس از کاربرد کوتاه‌مدت هیدروچار مشتق‌شده از هیدروچار حاصل از لجن فاضلاب تشخیص داده بودند،

سازگار بود (۱۵).

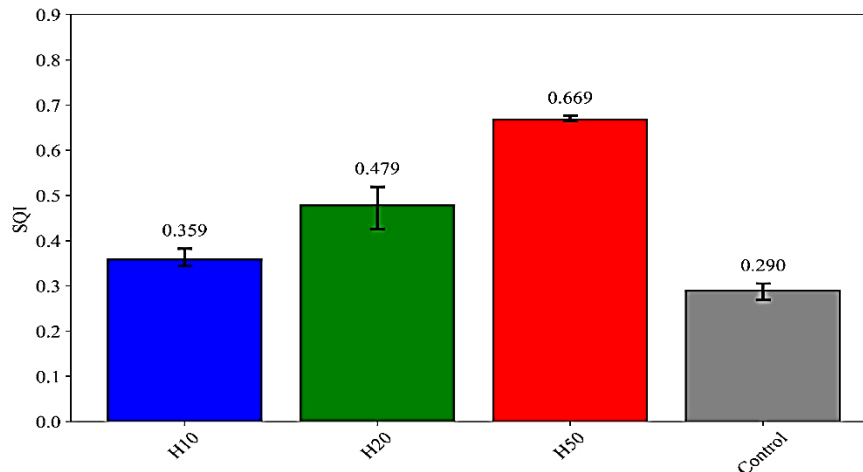
به‌طور کلی، نتایج نشان داد که کاربرد هیدروچار، به‌ویژه در سطوح بیشتر، موجب بهبود چشمگیر مواد آلی و عناصر غذایی خاک، اصلاح برخی ویژگی‌های فیزیکی و افزایش شاخص کیفیت خاک شد. با این حال، کاهش pH و افزایش هدایت الکتریکی در تیمار H50 می‌تواند در بلندمدت اثرهای منفی بر پایداری خاک داشته باشد؛ بنابراین، انتخاب سطح بهینه هیدروچار مانند H20 می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای بهبود حاصلخیزی و حفظ پایداری خاک توصیه شود.

نتایج تحلیل آماری شاخص کیفیت خاک (SQI) تحت تیمارهای مختلف هیدروچار

ارزیابی کیفیت خاک مستلزم استفاده از مجموعه‌ای از خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که هر کدام جنبه خاصی از سلامت خاک و عملکرد اکولوژیکی آن را منعکس می‌کنند (۲۹ و ۳۳). انتخاب دقیق و هدفمند این خواص نقش مهمی در افزایش دقت، تفسیرپذیری و جامعیت شاخص‌های ترکیبی کیفیت خاک دارد.

نتایج آزمون شاپیرو - ویلک نشان داد که داده‌های شاخص کیفیت خاک (SQI) در تیمارهای شاهد، H20 و H50 از توزیع نرمال پیروی می‌کنند؛ اما در تیمار H10 توزیع نرمال دیده نشد. با وجود این، با توجه به همگنی واریانس‌ها و مقاومت نسبی ANOVA در برابر انحراف‌های جزئی از نرمال‌بودن، تحلیل آماری معتبر تلقی شد.

آزمون لون همگنی واریانس‌ها را بین تیمارها تأیید کرد. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که میانگین SQI بین تیمارهای مختلف اختلاف معناداری دارد. نتایج آزمون توکی HSD نشان داد که تمامی مقایسه‌های زوجی بین تیمارها معنادار بودند. به‌طور مشخص، میانگین SQI در تیمار H50 $0.815 \pm$ (۰/۱۹)، به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای H20 $0.546 \pm$ (۰/۴۹) و H10 $0.336 \pm$ (۰/۱۸) و شاهد $0.159 \pm$ (۰/۶۰) بود. همچنین، تیمارهای H20 و H10 به‌ترتیب نسبت به تیمار



شکل ۳. تغییرات شاخص کیفیت خاک (SQI) تحت تیمارهای مختلف هیدروچار H10، H20، H50 و تیمار شاهد

جدول ۱. مقادیر میانگین، انحراف معیار و گروه‌بندی توکی برای شاخص کیفیت خاک (SQI) در تیمارهای مختلف

تیمار	میانگین SQI	انحراف معیار	آزمون توکی*
شاهد	۰/۱۵۹	۰/۰۶۰	a
H10	۰/۳۳۶	۰/۰۱۸	b
H20	۰/۵۴۶	۰/۰۴۹	c
H50	۰/۸۱۵	۰/۰۱۹	d

* میانگین‌هایی که دارای حروف متفاوت هستند، اختلاف معناداری در سطح ۰/۰۵ نشان می‌دهند.

شاهد موجب افزایش قابل توجه SQI شدند (شکل ۳ و جدول ۱).

این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت و تدریجی تیمارها بر بهبود کیفیت خاک است؛ به گونه‌ای که بیشترین اثر به تیمار H50 اختصاص دارد. این نتایج که با مطالعات قبلی همسو هستند، اثرهای مفید اصلاح‌کننده‌های آلی را بر بهبود خواص خاک مانند افزایش محتوای ماده آلی، افزایش ظرفیت نگهداری مواد مغذی و تحریک فعالیت بیولوژیکی برجسته می‌کنند (۲، ۶، ۸ و ۱۹).

سطح کاربرد دیده شد. تیمار H50 بیشترین بهبود را در شاخص کیفیت خاک نشان داد؛ اما سطح مصرف متوسط مانند H20 می‌تواند به عنوان سطح بهینه پیشنهاد شود؛ زیرا علاوه بر ارتقای حاصلخیزی خاک، از بروز خطرات احتمالی ناشی از افزایش شوری در بلندمدت جلوگیری می‌کند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که استفاده از شاخص‌های یکپارچه کیفیت خاک، ابزاری کارآمد برای ارزیابی جامع اثرهای اصلاح‌کننده‌های آلی بر پایداری و سلامت خاک محسوب می‌شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه شهید چمران اهواز به‌ویژه معاونت پژوهش و فناوری به دلیل ایجاد بستر مناسب علمی و پژوهشی برای انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

کاربرد هیدروچار تأثیر مثبت و معنی‌داری بر شاخص کیفیت خاک داشت و روند بهبود تدریجی کیفیت خاک با افزایش

References

منابع مورد استفاده

1. Abel, S., A. Peters, S. Trinks, H. Schonsky, M. Facklam and G. Wessolek. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 202: 183-191.
2. Ai, F., S. Zheng, C. Zeng, B. Li, K. Zhang, C. Zhang, Q. Li and L. Kang. 2025. Soil ecosystem multifunctionality and growth characteristics of *Leymus chinensis* were enhanced after sandy soil amendment with vermicompost and soil conditioner in soil-plant-microbe system. *Environmental Technology and Innovation* 39: 104226.
3. Al-Nuaimy, M. N. M., N. Azizi, Y. Nural and E. Yabalak. 2024. Recent advances in environmental and agricultural applications of hydrochars: A review. *Environmental Research* 250: 117923.
4. Anikwe, M. and K. Ife. 2023. The role of soil ecosystem services in the circular bioeconomy. *Frontiers in Soil Science* 3: 1-18.
5. Bagnall, D., J. Shanahan, A. Flanders, C. Morgan and C. Honeycutt. 2021. Soil health considerations for global food security. *Agronomy Journal* 113(9): 4581-4589.
6. Blouin, M., J. Barrere, N. Meyer, S. Lartigue, S. Barot and J. Mathieu. 2019. Vermicompost significantly affects plant growth: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 39(4): 34.
7. Bona, D., D. Scrinzi, G. Tonon, M. Ventura, T. Nardin, F. Zotte, D. Andreis, G. Andreottola, L. Fiori and S. Silvestri. 2022. Hydrochar and hydrochar co-compost from OFMSW digestate for soil application: 2. Agro-environmental properties. *Journal of Environmental Management* 312: 114894.
8. Castellini, M., C. Bondi, L. Giglio and M. Iovino. 2024. Impact of vermicompost addition on water availability of differently textured soils. *Heliyon* 10(15): e35699.
9. Cheng, Y., X. Wang, L. Zhao, X. Zhang, Q. Kong, H. Li, X. You and Y. Li. 2023. Wheat straw pyrochar more efficiently decreased enantioselective uptake of dinotefuran by lettuce and dissemination of antibiotic resistance genes than hydrochar in an agricultural soil. *Science of The Total Environment* 880: 163088.
10. Choudhury, B. and S. Mandal. 2021. Indexing soil properties through constructing minimum datasets for soil quality assessment of surface and profile soils of intermontane valley (Barak, Northeast India). *Ecological Indicators* 123: 107369.
11. da Luz, F. B., V. R. da Silva, F. J. K. Mallmann, C. A. B. Pires, H. Debiasi, J. C. Franchini and M. R. Cherubin. 2019. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 281: 100-110.
12. Daneshvar, S., M. R. Mosaddeghi and M. Afyuni. 2024. Effect of biochar and hydrochar of pistachio residues on physical quality indicators of a sandy loam soil. *Geoderma Regional* 36: e00740.
13. De Jager, M. and L. Giani. 2021. An investigation of the effects of hydrochar application rate on soil amelioration and plant growth in three diverse soils. *Biochar* 3: 349-365.
14. De Jager, M., M. Röhrdanz and L. Giani. 2020. The influence of hydrochar from biogas digestate on soil improvement and plant growth aspects. *Biochar* 2(2): 177-194.
15. Di Santo, T., R. Marzaioli, E. Coppola, L. Zaccariello, D. Battaglia, S. Castaldi, R. D'Ascoli, S. Papa, S. Strumia and G. Battipaglia. 2025. Enhancing soil health with hydrochar: Improvements in chemical and biological properties. *Journal of Environmental Management* 385: 125659.
16. Divband Hafshejani, L. and A. A. Naseri. 2023. A study on the effects of sugarcane bagasse hydrochar as an environmentally friendly fertilizer on bean plant and sandy loam soil characteristics. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 46(4): 29-40.
17. Dong, H., A. Leung, J. Liu, R. Chen and W. Lui. 2024. Microstructural investigation of the unsaturated hydraulic properties of hydrochar-amended soils. *Acta Geotechnica* 19: 833-853.
18. Feng, Y., N. Wang, H. Fu, H. Xie, L. Xue, Y. Feng, G. E. J. Poinern and D. Chen. 2023. Manure-derived hydrochar superior to manure: Reducing non-point pollution risk by altering nitrogen and phosphorus fugacity in the soil-water system. *Waste Management* 168: 440-451.
19. Ibrahim, A. and R. Horton. 2021. RETRACTED: Biochar and compost amendment impacts on soil water and pore size distribution of loamy sand soil. *Soil Science Society of America Journal* 85(4): 1021-1036.
20. Islam, M., M. S. H. Limon, M. Romić and M. A. Islam. 2021. Hydrochar-based soil amendments for agriculture: A review of recent progress. *Arabian Journal of Geosciences* 14: 1-16.
21. Jafari Tarf, O., M. O. Akca, Y. O. Donar, S. Bilge, O. C. Turgay and A. Sinağ. 2022. The short-term effects of pyro- and hydrochars derived from different organic wastes on some soil properties. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12(1): 129-139.

22. Lang, Q., X. Guo, G. Zou, C. Wang, Y. Li, J. Xu, X. Zhao, J. Li, B. Liu and Q. Sun. 2023. Hydrochar reduces oxytetracycline in soil and Chinese cabbage by altering soil properties, shifting microbial community structure and promoting microbial metabolism. *Chemosphere* 338: 139578.
23. Lehmann, J., D. Bossio, I. Kögel-Knabner and M. Rillig. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth and Environment* 1: 544–553.
24. Marzaioli, R., R. D'Ascoli, R. A. De Pascale and F. A. Rutigliano. 2010. Soil microbial community as affected by heavy metal pollution in a Mediterranean area of Southern Italy. *Fresenius Environmental Bulletin* 19: 2411–2419.
25. Nabiollahi, K., F. Golmohamadi, R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry and M. Davari. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma* 318: 16–28.
26. Nabiollahi, K., R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry and S. Moradian. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators* 83: 482–494.
27. Omer, E., D. Szlatenyi, S. Csenki, J. Alrwashdeh, I. Czako and V. Láng. 2024. Farming practice variability and its implications for soil health in agriculture: A review. *Agriculture* 14(12), 2114.
28. Qi, Y., J. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149: 325–334.
29. Ratcliffe, S., B. Bosman and M. Carnol. 2018. Spatial and temporal variability of biological indicators of soil quality in two forest catchments in Belgium. *Applied Soil Ecology* 126: 148–159.
30. Rodríguez, C., V. Durán-Zuazo, M. S. Rodríguez, I. García-Tejero, B. G. Ruiz and S. C. Tavira. 2022. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: A review. *Soil Systems* 6(4): 87.
31. Shao, G., J. Ai, Q. Sun, L. Hou and Y. Dong. 2020. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological Indicators* 115: 106439.
32. Sun, K., L. Han, Y. Yang, X. Xia, Z. Yang, F. Wu, F. Li, Y. Feng and B. Xing. 2020. Application of hydrochar altered soil microbial community composition and the molecular structure of native soil organic carbon in a paddy soil. *Environmental Science & Technology* 54(5): 2715–2725.
33. Vaezi, A., S. Sadeghi, H. Bahrami and M. Mahdian. 2008) Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology* 97(3–4): 414–423.
34. Wang, X., J. Duo, Z. Jin, F. Yang, T. Lai and E. Collins. 2025. Effects of hydrothermal carbonization conditions on the characteristics of hydrochar and its application as a soil amendment: A review. *Agronomy* 15(2): 327.
35. Xing, Y., Y. Xie and X. Wang. 2025. Enhancing soil health through balanced fertilization: A pathway to sustainable agriculture and food security. *Frontiers in Microbiology* 16: 1536524.
36. Xue, G., L. Zhang, X. Fan, K. Luo, S. Guo, H. Chen, X. Li and Q. Jian. 2022. Responses of soil fertility and microbiomes of atrazine contaminated soil to remediation by hydrochar and persulfate. *Journal of Hazardous Materials* 435: 128944.
37. Yan, T., Z. Zhang, Z. Zhang, W. Wang, D. Li, T. Zhang and Z. Zhu. 2024. Applying hydrochar affects soil carbon dynamics by altering the characteristics of soil aggregates and microbes. *Agronomy* 14(5): 1015.
38. Yang, T., K. Siddique and K. Liu. 2020. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health: A review. *Global Ecology and Conservation* 23: e01118.
39. Zhou, Y., H. Ma, Y. Xie, X. Jia, T. Su, J. Li and Y. Shen. 2020. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China. *Ecological Indicators* 118: 106743.