

Depth Assessment of Soil Properties Using an Integrated Effect Size–Based and Multivariate Approach (Case Study: Soils of Razavi Khorasan Province)

N. Mazloom^{1*} – M. Zangiabadi¹

1- Soil and Water Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: n.mazloom@areeo.ac.ir)

Received: 06 February 2026

Revised: 06 April 2026

Accepted: 15 April 2026

Available Online: 15 April 2026

How to cite this article:

Mazloom, N., & Zangiabadi, M. (2026). Depth assessment of soil properties using an integrated effect size–based and multivariate approach (Case study: Razavi Khorasan Province). *Journal of Water and Soil*, 39(6), 573-587. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97726.1524>

Introduction

Soil is a fundamental natural resource that underpins ecosystem functioning, agricultural productivity, water regulation, and biogeochemical cycling. Vertical heterogeneity of soil properties along the profile reflects the combined influence of biological inputs, pedogenic processes, and land management. Soil depth strongly controls the distribution of organic matter, nutrients, soluble salts, and textural components, thereby affecting root development, nutrient uptake, and crop resilience under environmental stresses such as drought.

Most previous studies relied primarily on classical statistical tests and comparisons of mean values between layers. While useful for detecting statistically significant differences, these approaches provide limited information on the magnitude, direction, and functional relevance of depth-related changes. In highly variable and non-normally distributed soil systems, reliance on p-values alone can lead to overinterpretation of minor differences or underestimation of ecologically important gradients.

Recent advances emphasize effect size metrics and uncertainty estimation to quantify soil variability more robustly. Non-parametric indices, such as the rank-biserial effect size, allow depth-driven changes to be quantified independent of sample size and distributional assumptions. This study focuses on providing a comprehensive depth-oriented assessment of soil physicochemical properties using effect size–based approaches and classification into depth stability and management-relevant categories.

Materials and Methods

Soil samples were collected from agricultural fields of Razavi Khorasan Province of Iran at two depths: 0–30 cm (surface) and 30–60 cm (subsurface), using a paired design to minimize spatial heterogeneity. A wide range of physicochemical properties was analyzed, including organic carbon, available P and K, exchangeable cations, EC, pH, carbonate parameters, and selected micronutrients.

Paired non-parametric tests were applied for each variable, and the rank-biserial effect size (r_{rb}) was calculated to quantify the magnitude and direction of depth-related changes. Bootstrap resampling was used to estimate 95% confidence intervals. Based on effect size magnitude and confidence intervals, variables were classified into stable, quasi-stable, and depth-sensitive categories, which were further translated into practical management-oriented classes.

Results and Discussion

Depth-sensitive properties included organic carbon, available phosphorus, potassium, and manganese, all exhibiting large effect sizes and pronounced accumulation in the surface layer. The enrichment of organic carbon



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97726.1524>

reflects concentrated biological inputs, crop residue return, and intensified microbial activity in the topsoil, whereas its sharp decline with depth indicates restricted vertical transfer and limited subsoil biological functioning. Phosphorus accumulation in the surface layer is consistent with its low mobility and strong fixation in calcareous soils, underscoring the importance of depth-aware phosphorus management strategies to enhance root access in deeper horizons. The marked differences in potassium likely result from the combined effects of crop uptake, mineral weathering, and partial leaching, highlighting the necessity for root-zone-oriented monitoring and fertilization practices. Among micronutrients, manganese showed the greatest depth sensitivity, reflecting its responsiveness to redox dynamics and pH variations, and indicating potential risks of localized deficiency or toxicity within the soil profile.

Copper and bicarbonate demonstrated moderate effect sizes, suggesting measurable but less pronounced depth-related variation. In contrast, clay, silt, pH, TNV, Zn, and Ca exhibited small effect sizes, indicating relative structural stability across depths. Sodium and chloride remained largely unchanged, implying that salinity distribution is relatively uniform within the studied profile and not strongly stratified under current conditions.

The classification of variables into depth-stability and management-priority categories provides a practical framework for translating statistical outputs into agronomic decision-making. Overall, the findings reveal that reliance on surface soil analysis alone can lead to incomplete or potentially misleading interpretations of nutrient status. Depth-aware management, including precision placement technologies and fertilizer banding systems, can improve nutrient use efficiency, enhance subsoil fertility, and reduce environmental losses, thereby contributing to more resilient soil-plant systems under semi-arid conditions.

Conclusion

By integrating paired depth-wise comparisons, PERMANOVA, and nonparametric effect size metrics, this study provides a robust framework for assessing vertical soil heterogeneity beyond conventional p-value-based approaches. The results showed pronounced and practically meaningful depth-related differences for key chemical properties, particularly soil organic carbon, available phosphorus, potassium, and manganese, while physical properties and basic indicators such as pH, clay, silt, and calcium carbonate exhibited limited variation. These patterns reflect the concentration of biological activity and management inputs in surface layers and the relative chemical depletion of deeper horizons, which constrains root development, nutrient uptake, and drought resilience in agricultural systems of Razavi Khorasan Province. Overall, the findings highlight that soil fertility assessments based solely on surface sampling can be misleading and underscore the need for targeted, depth-oriented soil management to improve nutrient use efficiency and enhance the sustainability of soil-plant systems, particularly under water-limited conditions.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to the Soil and Water Research Department of the Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center for their support in conducting this study. The authors also gratefully acknowledge the valuable cooperation and technical assistance provided by the laboratory staff.

Keywords: Effect size, Fertility management, PERMANOVA, Soil depth

ارزیابی عمقی ویژگی‌های خاک با استفاده از رویکرد تلفیقی مبتنی بر اندازه اثر و تحلیل چندمتغیره (مطالعه موردی: خاک‌های استان خراسان رضوی)

نجمه مظلوم^۱* - مهدی زنگی آبادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

چکیده

توزیع عمقی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از عوامل تعیین‌کننده حاصلخیزی و تاب‌آوری سیستم‌های زراعی است، با این حال در بسیاری از مطالعات، ارزیابی این تغییرات به مقایسه‌های سطحی و معنی‌داری آماری محدود شده‌است. پژوهش حاضر با رویکردی نوآورانه و فراتر از آزمون‌های کلاسیک، حساسیت عمقی متغیرهای حاصلخیزی خاک را در اراضی کشاورزی استان خراسان رضوی (۳۲۸ نقطه) بررسی می‌کند. بدین منظور، نیم‌رخ خاک در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر با تلفیق تحلیل چندمتغیره و شاخص اندازه اثر رتبه‌ای دوجبهی با بازه‌های اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی شد. مجموعه‌ای از ویژگی‌ها شامل عناصر پرمصرف و کم‌مصرف، پ‌هاش خاک، هدایت الکتریکی، کربن آلی و بافت خاک اندازه‌گیری و اثر عمق بر ساختار کلی داده‌ها با استفاده از آزمون پرمناو بررسی شد. نتایج نشان داد که عمق خاک اثر معنی‌داری بر ترکیب ویژگی‌های خاک دارد و برخی متغیرها، به‌ویژه کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب و منگنز، دارای اندازه اثر بزرگ و حساسیت عمقی بالا هستند؛ در مقابل، متغیرهایی مانند سدیم تغییرات عمقی ناچیزی نشان دادند. طبقه‌بندی متغیرها بر اساس شدت اثر و پایداری عمقی، آشکار ساخت که تجمع عناصر پرمصرف عمدتاً به لایه سطحی محدود شده و لایه‌های زیرین از نظر کیفیت حاصلخیزی در وضعیت ضعیف‌تری قرار دارند. این یافته‌ها ضمن برجسته‌کردن محدودیت اتکای صرف به نمونه‌برداری سطحی، ضرورت گذار از مدیریت یکنواخت به سمت مدیریت عمق‌محور و هدفمند را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، چارچوب تحلیلی ارائه‌شده در این مطالعه، با تأکید بر شدت واقعی و اهمیت عملی تغییرات عمقی، مبنایی کاربردی برای طراحی برنامه‌های تغذیه‌ای مبتنی بر نیم‌رخ خاک، افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها و ارتقای پایداری تولید در سیستم‌های زراعی را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اندازه اثر، پرمناو، عمق خاک، مدیریت حاصلخیزی خاک

مقدمه

این میان، عمق خاک یکی از مهم‌ترین ابعاد ناهمگنی خاک محسوب می‌شود که کنترل‌کننده توزیع عمودی عناصر غذایی، مواد آلی، املاح محلول و ویژگی‌های بافتی در نیم‌رخ خاک است (Richter & Markewitz, 1995). لایه‌های سطحی خاک معمولاً تحت تأثیر مستقیم ورودی‌های زیستی، بقایای گیاهی، فعالیت میکروبی و عملیات مدیریتی قرار دارند، در حالی که لایه‌های زیرسطحی بیشتر بازتاب‌دهنده فرآیندهای بلندمدت و کند خاک‌زایی مانند شست‌وشوی عمقی، انتقال مواد، تجمع ثانویه املاح و واکنش‌های شیمیایی آهسته‌تر هستند

خاک به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین منابع طبیعی، نقشی اساسی در عملکرد اکوسیستم‌ها، تنظیم چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی، ذخیره‌سازی کربن، تغذیه گیاه و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک حاصل برهم‌کنش پیچیده عواملی نظیر اقلیم، ماده مادری، توپوگرافی، زمان و مدیریت هستند و این ویژگی‌ها در مقیاس‌های مکانی و عمقی مختلف تغییر می‌کنند (Jenny, 1994).

۱- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: n.mazloom@areeo.ac.ir)

(Nakagawa & Cuthill, 2007; 1994). از این رو، گزارش اندازه اثر، به‌ویژه در مطالعات مقایسه‌ای عمقی که انتظار می‌رود بسیاری از تغییرات تدریجی و با بزرگی محدود باشند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر، خاک یک سامانه ذاتاً چندمتغیره است و رفتار آن حاصل برهم‌کنش هم‌زمان مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. بنابراین، بررسی اثر عمق خاک صرفاً بر اساس متغیرهای منفرد نمی‌تواند تصویر کاملی از ساختار و عملکرد سیستم خاک ارائه دهد. روش‌های تحلیل چندمتغیره غیرپارامتری، مانند آزمون پرمانوا^۲ مبتنی بر ماتریس‌های بی‌تشابهی (نظیر فاصله بری-کورتیس^۳)، این امکان را فراهم می‌کنند که تفاوت کلی ساختار ویژگی‌های خاک بین عمق‌های مختلف بدون نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها ارزیابی شود. با این حال، نتایج این روش‌ها اغلب بدون پیوند سیستماتیک با اندازه اثر متغیرهای منفرد تفسیر می‌شوند و اطلاعات محدودی درباره جهت و شدت تغییرات هر ویژگی ارائه می‌دهند.

با وجود پیشرفت‌های روش‌شناختی، هنوز خلأ قابل‌توجهی در مطالعاتی وجود دارد که به‌طور هم‌زمان از تحلیل‌های زوجی ناپارامتری، شاخص‌های اندازه اثر، برآورد عدم‌قطعیت و تحلیل‌های چندمتغیره برای ارزیابی تغییرات عمقی خاک استفاده کنند (Anderson, 2001; Legendre & Legendre, 2012). به‌ویژه، چارچوبی یکپارچه که بتواند هم تفاوت‌های کلی سیستم خاک را در سطح چندمتغیره و هم شدت و پایداری تغییرات هر متغیر را به‌صورت کمی و تفسیرپذیر ارزیابی کند، در ادبیات علوم خاک به‌ندرت ارائه شده است (Anderson & Walsh, 2013). این خلأ روش‌شناختی، استخراج پیام‌های مدیریتی شفاف مبتنی بر حساسیت عمقی ویژگی‌های خاک را با چالش مواجه ساخته است. در سال‌های اخیر، تأکید فزاینده‌ای بر استفاده از رویکردهای داده‌محور مبتنی بر اندازه اثر، برآورد عدم‌قطعیت و نمایش‌های تصویری استنباطی در علوم مختلف شکل گرفته است (Wasserstein et al., 2016; Cumming, 2025; Wasserstein et al., 2019). این رویکردها امکان تمایز میان وجود تفاوت آماری و اهمیت واقعی تفاوت را فراهم کرده و به درک عمیق‌تری از فرآیندهای حاکم بر تغییرات خاک منجر می‌شوند. در این میان، استفاده از طراحی‌های زوجی در مطالعات عمقی، به‌ویژه زمانی که نمونه‌برداری از اعماق مختلف یک نقطه یا نیم‌رخ خاک انجام می‌شود، می‌تواند اثر تغییرپذیری مکانی را کاهش داده و تمرکز تحلیل را بر تغییرات واقعی ناشی از عمق قرار دهد (Montgomery, 2017; Sokal & Rohlf, 1987).

چارچوبی یکپارچه که بتواند به‌صورت هم‌زمان تفاوت کلی سیستم خاک در سطح چندمتغیره و نیز شدت، جهت و پایداری تغییر هر ویژگی

(Buol et al., 2011). این تمایز فرآیندی سبب می‌شود که برخی ویژگی‌های خاک نسبت به عمق حساسیت بالایی نشان دهند، در حالی که سایر ویژگی‌ها پایداری نسبی خود را در امتداد نیم‌رخ خاک حفظ کنند. با این حال، تشخیص و کمی‌سازی این تفاوت‌ها همواره ساده نیست و به‌شدت به چارچوب تحلیلی مورد استفاده وابسته است. مطالعات متعددی به بررسی تغییرات عمقی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که محتوای آلی ماده خاک و عناصر غذایی نظیر نیتروژن و فسفر معمولاً در لایه‌های سطحی بیشینه بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد (Okolo et al., 2023; Zhou et al., 2020)؛ الگویی که به تجمع بقایای گیاهی و شدت فعالیت زیستی در سطح خاک نسبت داده می‌شود. الگوهای مشابهی نیز برای سایر ویژگی‌های خاک از جمله pH، هدایت الکتریکی و عناصر کم‌مصرف گزارش شده است (Dhakad et al., 2020; Getnet et al., 2025). این یافته‌ها اهمیت بررسی عمقی خاک را در مطالعات کیفیت خاک، پایداری اکوسیستم‌ها و مدیریت منابع برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که تحلیل تغییرات عمقی باید فراتر از مقایسه‌های ساده میانگین‌ها بوده و کل ساختار داده‌ها را در نظر بگیرد (Legendre & Legendre, 2012). با این وجود، بخش عمده‌ای از مطالعات تغییرات عمقی خواص خاک عمدتاً بر آزمون‌های کلاسیک معنی‌داری آماری و مقایسه میانگین‌ها متکی بوده‌اند. اگرچه این رویکردها در شناسایی تفاوت‌های آماری مفید هستند، اما به‌تنهایی قادر به بیان شدت، جهت و اهمیت اکولوژیکی یا مدیریتی این تفاوت‌ها نیستند. در بسیاری از موارد، تفاوت‌هایی که از نظر آماری معنی‌دار گزارش می‌شوند، دارای اندازه اثر^۱ کوچک بوده و از منظر عملکردی اهمیت محدودی دارند. اتکای صرف به مقادیر احتمال (p-value)، به‌ویژه در داده‌های خاک که اغلب غیرنرمال، ناهمسان و دارای پراکندگی بالا هستند، می‌تواند منجر به برداشت‌های اغراق‌آمیز از نقش عمق خاک در کنترل ویژگی‌های سیستم خاک شود (Wasserstein et al., 2019). پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف طراحی شده است و می‌کوشد با تلفیق تحلیل‌های زوجی ناپارامتری، شاخص‌های اندازه اثر، برآورد عدم‌قطعیت و تحلیل‌های چندمتغیره، تصویری جامع و کمی از تغییرات عمقی سیستم خاک ارائه دهد.

یکی از نقدهای اساسی به رویکردهای کلاسیک در علوم خاک، بی‌توجهی نسبی به اندازه اثر و تمرکز افراطی بر معنی‌داری آماری است (Wasserstein et al., 2016; Wasserstein et al., 2019). در حالی که اندازه اثر امکان کمی‌سازی شدت واقعی تغییرات را مستقل از حجم نمونه فراهم می‌کند و تمایز میان تفاوت‌های آماری و تفاوت‌های معنی‌دار از نظر بوم‌شناختی یا مدیریتی را ممکن می‌سازد (Cohen,

معنی‌داری آماری، اندازه اثر قابل توجهی داشته باشند. متغیرهای با اندازه اثر کوچک، شاخص‌های پایدار و کم‌حساس به عمق هستند، در حالی که متغیرهای با اندازه اثر متوسط تا بزرگ، شاخص‌های حساس به تغییرات عمقی محسوب می‌شوند. ارزیابی اثر عمق بر کیفیت خاک نیازمند رویکردهای چندمتغیره است و تحلیل‌های انجام‌شده سهم نسبی عمق در تغییرات کلی ویژگی‌ها را مشخص می‌کنند. چارچوب نظری تحقیق داده‌محور بوده و نتایج بازتاب‌دهنده روابط واقعی بین داده‌ها و فرآیندهای خاک است.

نرم‌افزار و بسته‌های آماری

کلیه تحلیل‌های این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار R (R Core Team, نسخه ۴.۵.۰، ۲۰۲۵) و در محیط نرم‌افزاری RStudio (نسخه ۳.۸۷+۲۰۲۵.۰۹.۰) انجام شد. بسته‌های اصلی مورد استفاده شامل *psych* و *skimr* برای آمار توصیفی، *nortest* برای آزمون نرمالیتی، *effectsize* و *bayestestR* برای محاسبه اندازه اثر و تحلیل‌های بیزی، *vegan* برای تحلیل‌های چندمتغیره مبتنی بر فاصله، *factoextra* و *ggplot2* برای ترسیم نتایج، و *DiagrammeR* برای طراحی نمودارهای مفهومی بودند.

طراحی مطالعه، پیش‌پردازش و کنترل کیفی داده‌ها

استان خراسان رضوی بین مدار جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. اکثر نواحی استان به جز قسمت‌های محدودی از آن، دارای اقلیم نیمه خشک می‌باشد (Emamian et al., 2021). در این مطالعه، ۳۲۸ نمونه خاک از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری اراضی کشاورزی شهرستان‌های مختلف استان به روش تصادفی طبقه‌بندی شده جمع‌آوری شد و از نظر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی مورد تجزیه آزمایشگاهی قرار گرفت. انتخاب این دو عمق به‌منظور بررسی هم‌زمان فرآیندهای غالب سطحی مانند تجمع ماده آلی و چرخه عناصر غذایی و همچنین محدودیت‌های زیرسطحی نظیر شوری و سدیمی شدن خاک انجام شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، در شرایط محیطی خشک و کوبیده‌شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. متغیرهای اندازه‌گیری‌شده (۲۰ متغیر) شامل پ‌هاش گل اشباع خاک (pH)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC)، درصد اشباع (SP) بر اساس وزن خشک و میزان آب لازم برای رسیدن به حالت اشباع، توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری، محتوای کربن آلی (SOC) به روش والکلی و بلک، فسفر به روش اولسن، پتاسیم قابل جذب با استفاده از فلیم فوتومتر، عناصر کم‌مصرف قابل‌استفاده (Cu)،

را به‌صورت کمی و تفسیرپذیر ارزیابی کند، در ادبیات علوم خاک به‌ندرت گزارش شده است. این خلأ روش‌شناختی، استخراج پیام‌های مدیریتی روشن مبتنی بر حساسیت عمقی ویژگی‌های خاک را با چالش مواجه می‌سازد. بر این اساس، هدف این مطالعه ارائه یک ارزیابی جامع و یکپارچه از تغییرات عمقی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بین دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر با رویکردی مبتنی بر اندازه اثر و تحلیل چندمتغیره است. در این پژوهش، با تلفیق آزمون‌های زوجی ناپارامتری، برآورد اندازه اثر غیرپارامتری و تحلیل‌های چندمتغیره مبتنی بر فاصله بری-کورتیس، تلاش شده است تا تمایز میان تفاوت‌های آماری صرف و تفاوت‌های عملکردی معنی‌دار مشخص شود. علاوه بر این، در مطالعه حاضر شاخصی با عنوان شاخص پایداری عمقی^۱ (DSI) معرفی و به‌کار گرفته شده است که بر پایه اندازه اثر تعریف می‌شود و امکان رتبه‌بندی ویژگی‌های خاک را از نظر حساسیت یا پایداری آن‌ها در امتداد عمق فراهم می‌سازد. این شاخص دیدگاهی فرآیندمحور و کاربردی برای تفسیر الگوهای عمقی خاک ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنای علمی دقیق‌تری برای پایش کیفیت خاک، مدیریت پایدار منابع خاک و تصمیم‌گیری‌های کشاورزی و محیط‌زیستی فراهم کند.

مواد و روش‌ها

تئوری تحقیق

این پژوهش بر این فرض نظری استوار است که تغییرات عمقی ویژگی‌های خاک صرفاً به‌عنوان تفاوت‌های آماری ساده بین لایه‌ها قابل تبیین نیستند، بلکه بازتابی از برهم‌کنش فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی در امتداد نیم‌رخ خاک می‌باشند. از این منظر، عمق خاک به‌عنوان یک گرادیان محیطی پیوسته در نظر گرفته می‌شود که شدت و جهت اثر آن بر متغیرهای خاک می‌تواند بسته به ماهیت فرآیندهای غالب، متفاوت باشد. به‌طور مثال، پژوهشی درباره تأثیر عمق خاک بر ساختار جامعه میکروبی نشان می‌دهد که عمق می‌تواند بخش قابل توجهی از تغییرات کلی جامعه را توضیح دهد و از تحلیل‌های چندمتغیره مانند پرمانوا برای تعیین سهم نسبی عمق در واریانس استفاده می‌شود (Hao et al., 2021). از منظر اکولوژیکی، مطالعات اکوسیستم‌ها نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های چندمتغیره باعث آشکار شدن پاسخ‌های عملکردی متنوع به گرادیان عمقی می‌شود و این گرادیان را باید به‌عنوان یک عامل محیطی پیوسته تلقی کرد (Bernard-Verdier et al., 2012).

این مطالعه بر این اساس است که تفاوت‌های عمقی خاک تنها وقتی از نظر اکولوژیکی و مدیریتی معنی‌دار هستند که علاوه بر

(Kerby, 2014) گزارش شد. برای هر r_{rb} بازه اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شد و علامت آن نیز نشان‌دهنده جهت تغییر عمقی بود، به طوری که مقادیر مثبت نشان‌دهنده مقادیر بالاتر در لایه سطحی و مقادیر منفی نشان‌دهنده مقادیر بیشتر در لایه زیر سطحی بود. شدت اندازه اثر نیز بر اساس حدود استاندارد ارائه شده برای آزمون‌های غیرپارامتری توسط پرز (Fiel Peres, 2026) به چهار گروه طبقه‌بندی و در تفسیر نمودارها و نتایج مدیریتی استفاده شد:

$$|r| < 0.1 : \text{اثر ناچیز}$$

$$0.1 \leq |r| < 0.3 : \text{اثر کوچک}$$

$$0.3 \leq |r| < 0.5 : \text{اثر متوسط}$$

$$|r| \geq 0.5 : \text{اثر بزرگ}$$

برای بررسی جهت و شدت تغییرات ویژگی‌های خاک بین دو عمق نیز از شاخص احتمال جهت اثر^۵ (PD) در چارچوب آمار بیزی^۶ استفاده شد (Makowski et al., 2019). ابتدا تفاوت زوجی هر متغیر بین دو عمق محاسبه گردید و سپس احتمال مثبت بودن این تفاوت برای هر متغیر محاسبه شد. مقادیر PD نزدیک به ۱ نشان‌دهنده احتمال بالا برای افزایش و مقادیر نزدیک به ۰/۵ نشان‌دهنده تغییرات نامطمئن یا بدون جهت مشخص می‌باشد.

تحلیل تمایز چندمتغیره عمقی پرمانو^۷

برای بررسی تفاوت کلی ساختار خاک بین دو عمق، داده‌ها در یک چارچوب واحد ادغام و عمق به عنوان متغیر طبقه‌ای تعریف شد. تحلیل بر روی متغیرهای عددی منتخب انجام گرفت و ماتریس فاصله نمونه‌ها با استفاده از شاخص بری-کورتیس (Oksanen, 2015) محاسبه شد. تفاوت چندمتغیره بین عمق‌ها با آزمون پرمانو و ۹۹۹ تکرار تصادفی به کمک تابع adonis2 ارزیابی گردید. به منظور بررسی یکنواختی پراکنش گروه‌ها نیز، آزمون پرمدیسپ^۸ اجرا شد که عدم معنی‌داری آن نشان‌دهنده همگنی پراکنش و اعتبار نتایج پرمانو بود (Anderson, 2017).

شاخص پایداری عمقی (DSI)^۹ و ارائه چهارچوب مدیریتی

برای ارزیابی پایداری خاک در عمق، تغییرات لایه سطحی و زیرسطحی به صورت زوجی و بر اساس تفسیر هم‌زمان سه معیار اصلی شامل جهت و اندازه تغییرات (اندازه اثر)، معنی‌داری آماری و رفتار متغیرهای کلیدی خاک بررسی شد. متغیرهایی با اندازه اثر بزرگ و اختلاف معنی‌دار به عنوان نشانه ناپایداری ساختاری یا عملکردی، به ویژه

Fe، Mn و Zn) به روش عصاره‌گیری با DTPA با استفاده از دستگاه جذب اتمی، کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول شامل کلسیم و منیزیم محلول به روش تیتراسیون با EDTA، سدیم محلول با دستگاه فلیم‌فتومتر، کلر محلول با روش موهر و بیکربنات محلول با روش تیتراسیون اسید-باز و نسبت جذب سدیم (SAR) بر اساس غلظت یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم محلول بودند (Sparks et al., 2020). این متغیرها نماینده طیفی از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک هستند و امکان ارزیابی پاسخ سیستم خاک به گرادیان عمقی را فراهم می‌کنند. داده‌های مربوط به نتایج آزمایشگاهی، پس از ورود به محیط نرم‌افزار RStudio از نظر ساختار متغیرها، نوع داده (عددی و غیرعددی) و وجود داده‌های مفقود بررسی شدند. متغیرهای غیرعددی (مانند نام شهر) در تحلیل‌های آماری وارد نشدند. برای بررسی الگوی داده‌های مفقود از شاخص‌های گرافیکی و آماری استفاده شد و تحلیل‌ها بر اساس داده‌های کامل انجام گرفت.

آمار توصیفی و بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها

برای هر متغیر خاک، آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، میانه و دامنه تغییرات (حداقل و حداکثر) به صورت جداگانه و برای هر عمق محاسبه شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون اندرسون-دارلینگ^۱ برای هر متغیر و هر عمق بررسی شد. برای کنترل خطای نوع اول ناشی از انجام آزمون‌های متعدد، مقادیر p با روش کنترل نرخ کشف کاذب FDR^۲ اصلاح شدند. این رویکرد، که به طور گسترده در تحلیل‌های آماری برای تعدیل p -value در چندین آزمون همزمان به کار می‌رود، نسبت به روش‌های سنتی مانند تصحیح بونفرونی، تعادل بهتری بین کشف نتایج واقعی و محدود کردن کشف‌های کاذب فراهم می‌کند (Benjamini & Hochberg, 1995).

مقایسه زوجی عمقی و تحلیل اندازه اثر جهت مقایسه عمقی خاک

با توجه به غیرنرمال بودن داده‌ها و ماهیت زوجی نمونه‌ها، داده‌های دو عمق بر اساس شناسه یکنای نمونه‌ها به صورت زوجی هم‌تراز شدند و از آزمون ناپارامتری ویلکاکسون زوجی^۳ با سطح معنی‌داری آماری برابر با ۰/۰۵ برای مقایسه هر متغیر بین دو عمق استفاده شد. با توجه به محدودیت تفسیر نتایج صرفاً بر اساس معنی‌داری آماری، اندازه اثر به عنوان شاخص اصلی شدت تمایز عمقی محاسبه شد. اندازه اثر اختلاف‌ها به صورت ضریب همبستگی رتبه‌ای دووجهی^۴ (r_{rb})

6- Bayesian statistics framework

7- PERMDISP- Permutational Analysis of Multivariate Dispersions

8- Depth Stability Index

1- Anderson-Darling

2- False Discovery Rate

3- Wilcoxon signed-rank (paired)

4- Rank-biserial correlation, r_{rb}

5- Probability of Direction

(Oliver, 2007). از این رو، استفاده از روش‌های غیر پارامتری و تحلیل‌های مبتنی بر اندازه اثر برای تفسیر معتبر داده‌ها ضروری تشخیص داده شد.

مقایسه غیرپارامتری تغییرات عمقی ویژگی‌های خاک

نتایج آزمون ناپارامتری ویلکاکسون زوجی نشان داد که اغلب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بین دو عمق ۳۰-۶۰ و ۳۰-۳۰ سانتی‌متر اختلاف معنی‌دار آماری دارند، به طوری که بیشترین تفاوت‌ها مربوط به ماده آلی، عناصر غذایی قابل جذب و عناصر کم‌مصرف بود (شکل ۱). در مقابل، متغیرهای نسبت جذب سدیم، درصد شن، سدیم و کلر تغییر عمقی معنی‌داری نشان ندادند (شکل ۱ و جدول ۲). این الگو بیانگر ناهمگنی عمودی خاک و تأثیر فرآیندهای زیستی و ژئوشیمیایی وابسته به عمق است. مقادیر بیشتر کربن آلی و فسفر قابل جذب در لایه سطحی احتمالاً ناشی از تجمع بقایای گیاهی، فعالیت میکروبی بیشتر و اثر مستقیم مدیریت زراعی است (Havlin, 2014)، در حالی که تغییرات عناصر کم‌مصرفی مانند آهن و منگنز می‌تواند به شرایط اکسایش-کاهش، واکنش خاک و فرآیندهای انحلال-رسوب در نیم‌رخ خاک مرتبط باشد.

هم‌پوشانی توزیع داده‌ها بین دو عمق نشان می‌دهد که تفسیر صرف بر اساس میانگین یا p-value کافی نیست و استفاده از تحلیل زوجی همراه با اندازه اثر برای درک اهمیت واقعی اختلاف‌ها ضروری است. این نتایج بر لزوم تحلیل جداگانه لایه‌های عمقی خاک و پرهیز از ادغام داده‌های عمقی در مطالعات خاک تأکید می‌کند، زیرا تلفیق لایه‌ها می‌تواند به از دست رفتن اطلاعات اکولوژیکی و مدیریتی مهم منجر شود.

در صورت تشدید فرآیندهایی مانند شوری و سدیمی‌شدن با عمق، تفسیر شدند؛ در حالی که تغییرات کوچک یا غیرمعنی‌دار بیانگر پایداری سامانه خاک تحت مدیریت موجود بود. این رویکرد مبتنی بر اندازه اثر، امکان ارزیابی کاربردی پایداری خاک را فراهم کرده و مبنایی برای طبقه‌بندی ویژگی‌های خاک از نظر اولویت مدیریتی ارائه می‌دهد.

نتایج و بحث

الگوی کلی داده‌ها و ناهمگنی عمقی ویژگی‌های خاک

آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو عمق ۳۰-۶۰ و ۳۰-۳۰ سانتی‌متر نشان داد که اغلب متغیرها، به‌ویژه ویژگی‌های شیمیایی شامل هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، یون‌های محلول، عناصر کم‌مصرف و عناصر غذایی قابل جذب، دارای دامنه تغییرات وسیع و توزیع‌های نامتقارن هستند (جدول ۱). این ناهمگنی زیاد بازتاب‌دهنده پیچیدگی ذاتی سیستم خاک و تأثیر هم‌زمان فرآیندهای زیستی، شیمیایی و مدیریتی است (Weil & Brady, 2016). در مقابل، برخی ویژگی‌ها مانند اجزای بافت خاک و کربنات کلسیم معادل تغییرات محدودتری در امتداد نیم‌رخ خاک نشان دادند که حاکی از کنترل غالب مواد مادری و فرآیندهای بلندمدت زمین‌شناختی است.

پهناش قلبایی خاک همراه با مقادیر بالای هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در هر دو عمق نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه عمدتاً قلبایی، شور تا بسیار شور و در مواردی سدیمی هستند. تداوم این ویژگی‌ها در لایه‌های زیرسطحی بیانگر آن است که این محدودیت‌ها در کل پروفیل خاک حضور داشته و می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی، مواد مادری و فرآیندهای تجمع املاح در محیط‌های نیمه‌خشک باشد. این نتایج تأکید می‌کند که ارزیابی کیفیت و حاصلخیزی خاک صرفاً بر اساس داده‌های سطحی، تصویری ناقص از وضعیت واقعی خاک ارائه می‌دهد و تحلیل‌های عمق‌محور برای درک صحیح عملکرد سیستم خاک-گیاه ضروری است.

نرمالیتی داده‌ها و پیامدهای روش‌شناختی

نتایج آزمون اندرسون-دارلینگ با اصلاح نرخ کشف کاذب نشان داد که اغلب متغیرها در هر دو عمق از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند (دامنه p-adj متغیرها بین 10^{-4} تا $8/75 \times 10^{-23}$). این غیرنرمال بودن بیانگر ناهمگنی شدید مکانی خاک‌ها و وجود مقادیر مرزی است که با دامنه تغییرات وسیع و انحراف معیار بالا در آمار توصیفی همخوانی دارد. به‌ویژه غیرنرمال بودن متغیرهایی مانند هدایت الکتریکی، سدیم و نسبت جذب سدیم نشان‌دهنده حضور لکه‌های موضعی با شوری و سدیمی بالا در منطقه است؛ الگویی رایج در خاک‌های شور و نیمه‌خشک که ناشی از ناهمگنی مکانی شدید، مدیریت نامتوازن و فرآیندهای غیرخطی خاک است (Webster &)

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر

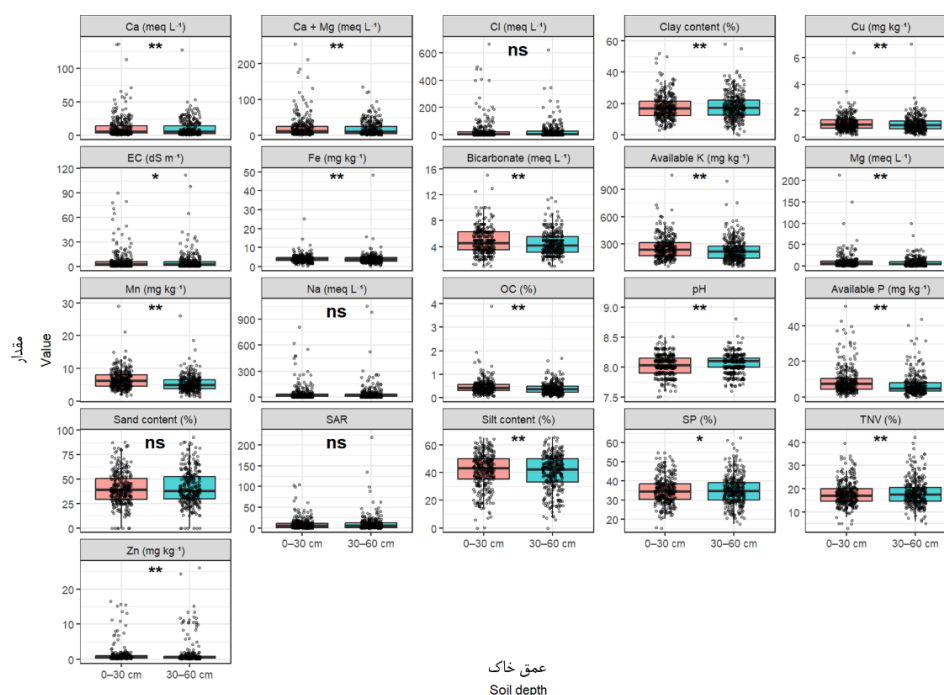
Table 1- Descriptive statistics of soil properties at 0-30 and 30-60 cm depths

ویژگی‌های خاک Soil variables	عمق: ۰-۳۰ سانتی متر Depth: 0-30 cm			عمق: ۳۰-۶۰ سانتی متر Depth: 30-60 cm		
	Mean $\pm$ SD	Median	Min-Max	Mean $\pm$ SD	Median	Min-Max
پ‌هاس pH	8.0 $\pm$ 0.17	8.0	7.5 – 8.5	8.0 $\pm$ 0.16	8.1	7.6 – 8.8
آهن Fe (mg kg ⁻¹)	4.0 $\pm$ 2.0	3.6	0.2 – 25.2	3.9 $\pm$ 3.0	3.65	0.2 – 48.3
بی‌کربنات Bicarbonate (meq L ⁻¹)	4.8 $\pm$ 2.0	4.5	1.0 – 15.0	4.4 $\pm$ 1.7	4.1	1.0 – 11.5
پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	254.6 $\pm$ 122.6	234.6	53.9 – 1059.0	227.1 $\pm$ 118.9	212.5	53.9 – 992.4
درصد اشباع جرمی SP (g g ⁻¹)	34.8 $\pm$ 6.87	34.4	15.2 – 54.7	35.0 $\pm$ 7.49	34.4	17.0 – 62.5
کربنات کلسیم معادل TNV (%)	17.8 $\pm$ 5.18	17.0	3.0 – 39.7	18.2 $\pm$ 5.66	17.3	5.1 – 42.2
درصد رس Clay content (%)	17.6 $\pm$ 7.6	16.8	3.3 – 52.0	18.2 $\pm$ 8.2	17.2	0.0 – 58.0
درصد سیلت Silt content (%)	41.2 $\pm$ 12.49	43.0	0.0 – 65.0	40.0 $\pm$ 12.53	42.3	0.0 – 65.6
درصد شن Sand content (%)	40.5 $\pm$ 16.22	38.8	0.0 – 87.7	41.1 $\pm$ 17.45	38.0	0.0 – 93.0
روی Zn (mg kg ⁻¹)	1.2 $\pm$ 2.37	0.5	0.1 – 16.6	1.4 $\pm$ 3.17	0.4	0.0 – 26.0
سدیم Na (meq L ⁻¹)	39.2 $\pm$ 88.9	11.2	0.2 – 807.4	37.3 $\pm$ 94.3	12.0	0.1 – 1052.2
فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	9.0 $\pm$ 7.4	7.2	0.1 – 51.2	6.5 $\pm$ 5.9	4.8	0.0 – 43.6
کلر Cl (meq L ⁻¹)	32.0 $\pm$ 77.3	6.3	0.2 – 662.5	25.5 $\pm$ 54.8	7.5	0.5 – 620.0
کلسیم Ca (meq L ⁻¹)	11.5 $\pm$ 16.5	5.6	0.6 – 136.8	10.0 $\pm$ 12.1	4.8	0.4 – 128.0
ماده آلی OC (%)	0.4 $\pm$ 0.32	0.4	0.0 – 3.9	0.3 $\pm$ 0.23	0.3	0.0 – 1.6
مجموع کلسیم و منیزیم Ca + Mg (meq L ⁻¹)	21.4 $\pm$ 30.4	10.9	0.8 – 254.0	18.1 $\pm$ 19.9	9.9	0.8 – 135.0
منگنز Mn (mg kg ⁻¹)	6.5 $\pm$ 2.8	6.1	1.6 – 29.0	5.3 $\pm$ 2.5	4.8	1.2 – 26.0
منیزیم Mg (meq L ⁻¹)	9.8 $\pm$ 17.5	5.2	0.0 – 213.0	8.1 $\pm$ 9.9	4.6	0.0 – 100.0
نسبت جذب سدیم SAR	9.3 $\pm$ 13.83	5.2	0.1 – 104.2	10.1 $\pm$ 18.00	5.6	0.1 – 219.4
هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	6.1 $\pm$ 11.7	2.3	0.3 – 90.4	5.5 $\pm$ 10.6	2.2	0.3 – 112.1

اندازه اثر و شدت واقعی تمایز عمقی

تحلیل اندازه اثر نشان داد که معنی‌داری آماری لزوماً به معنای اهمیت عملی اختلاف‌ها نیست (جدول ۲). بزرگ‌ترین اندازه اثرها مربوط به کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب و منگنز بود. این عناصر دارای p-value بسیار کوچک (کمتر از ۱۰^{-۸}) و اندازه اثر بزرگ

(۰/۵۸-۰/۷۳) بودند که بیانگر تمایز عمقی واقعی است و از نظر مدیریتی نیز مهم است (شکل ۲، جدول ۲). برای این متغیرها، بازه‌های اطمینان به‌طور کامل از صفر فاصله داشت که بیانگر اثر عمق قوی، پایدار و جهت‌دار است. بنابراین، اختلاف‌های زوجی این متغیرها منسجم بوده و ناشی از چند مشاهده پرت نیست.



شکل ۱- نمودار جعبه‌ای اختلاف توزیع متغیرهای خاک بین دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر

Figure 1- Boxplot comparison of soil properties showing statistically significant differences between the 0-30 and 30-60 cm soil depths

ns, **, * و * به ترتیب معنی عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ***, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$, $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

کشاورزی ایران عمدتاً در لایه‌های سطحی متمرکز است و توزیع عمقی آن به شدت تحت تأثیر شیوه‌های مصرف کودهای فسفاته و مدیریت خاک قرار دارد (Jalali et al., 2023). تفاوت عمقی پتاسیم احتمالاً بازتاب برداشت گیاه، ویژگی‌های کانی‌شناسی خاک و فرآیندهای شستشو بوده و ضرورت پایش این عنصر در کل نیم‌رخ خاک و تنظیم کوددهی متناسب با عمق توسعه ریشه را برجسته می‌سازد (Xu et al., 2025). همچنین، اندازه اثر بزرگ منگنز نشان‌دهنده حساسیت زیاد فراهمی این عناصر به تغییرات پهاش خاک و شرایط اکسایش-کاهش است که می‌تواند خطر کمبود آن در لایه‌های زیرسطحی یا سمیت آن را در لایه‌های سطحی خاک افزایش داده و بر لزوم مدیریت دقیق واکنش خاک و مصرف هدفمند عناصر کم‌مصرف تأکید کند (Abbas et al., 2025). تغییرات Cu و بی‌کربنات از منظر عمق معنی‌دار اما با اثر متوسط بودند و اهمیت عملی کمتری نسبت به منگنز، فسفر، پتاسیم و ماده آلی داشتند. درصد رس، سیلت، پهاش خاک، آهک و برخی عناصر مانند روی و کلسیم تغییرات محدودی داشتند و اثر عملی کمی نشان دادند، در حالی که سدیم و کلر تقریباً پایدار بودند و تغییر عمقی تأثیری عملی بر آن‌ها نداشت.

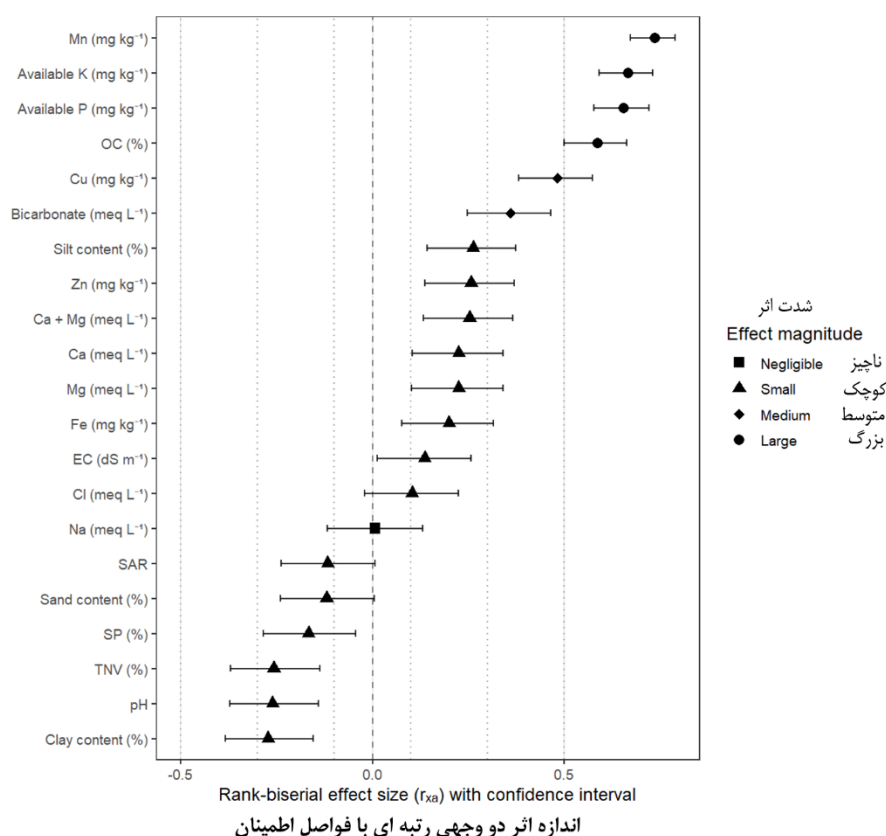
غلظت بیشتر کربن آلی در لایه سطحی بازتاب تمرکز فرآیندهای زیستی، ورودی بقایای گیاهی و اثر مستقیم مدیریت زراعی است، در حالی که کاهش آن در لایه زیرسطحی نشان‌دهنده افت فعالیت میکروبی و محدودیت انتقال عمودی کربن آلی می‌باشد (Cotrufo et al., 2019). این الگو حساسیت بالای ماده آلی به مدیریت خاک را تأیید کرده و بر نقش راهبردهایی نظیر کاهش شخم و افزایش ورودی‌های آلی در پایداری سیستم خاک و گیاه تأکید دارد. نتایج مطالعات دیگر نیز نشان می‌دهد که ذخیره کربن آلی خاک به‌طور معنی‌داری با عمق کاهش می‌یابد و بیشترین سهم آن در لایه‌های سطحی متمرکز است، که این الگو نقش کلیدی فرآیندهای زیستی سطح خاک و مدیریت را در توزیع عمقی کربن آلی تأیید می‌کند (Wiesmeier et al., 2019).

تجمع فسفر در لایه‌های سطحی، ناشی از تحرک محدود و تثبیت قوی آن در خاک، و اندازه اثر بزرگ آن نشان می‌دهد که توزیع عمقی فسفر به شدت تحت تأثیر شیوه مصرف کودهای فسفاته است، به گونه‌ای که مدیریت غیربهینه می‌تواند کارایی مصرف فسفر و دسترسی ریشه‌ها را محدود کند (Vance et al., 2024). نتایج فراتحلیلی جلالی و همکاران در سال ۱۴۰۲ نیز نشان داد که فسفر قابل جذب در خاک‌های

جدول ۲- مقایسه عمقی متغیرهای خاک با مقادیر p، اندازه اثر و بزرگی اثر

Table 2- Depth-wise comparison of soil variables with p-values, effect size, and effect magnitude

Variables متغیرها	p_value مقدار p	p_adj مقدار p تعدیل شده	r_rb اندازه اثر	CI_low حد پایین فاصله اطمینان	CI_high حد بالای فاصله اطمینان	PD جهت تغییرات	Effect magnitude بزرگی اثر
منگنز Mn (mg kg ⁻¹)	1.32E ⁻³⁰	2.78E ⁻²⁹	0.74	0.67	0.79	0.81	Large بزرگ
پتاسیم قابل جذب Available K (mg kg ⁻¹)	2.08E ⁻²²	1.46E ⁻²¹	0.67	0.59	0.73	0.69	Large بزرگ
فسفر قابل جذب Available P (mg kg ⁻¹)	4.08E ⁻²³	4.28E ⁻²²	0.66	0.58	0.72	0.70	Large بزرگ
ماده آلی OC (%)	9.46E ⁻¹⁹	4.97E ⁻¹⁸	0.59	0.50	0.66	0.70	Large بزرگ
مس Cu (mg kg ⁻¹)	3.46E ⁻¹³	1.45E ⁻¹²	0.48	0.38	0.57	0.65	Medium متوسط
بی کربنات Bicarbonate (meq L ⁻¹)	4.59E ⁻⁰⁷	1.61E ⁻⁰⁶	0.36	0.25	0.46	0.51	Medium متوسط
درصد رس Clay content (%)	2.55E ⁻⁰⁴	4.88E ⁻⁰⁴	-0.27	-0.38	-0.15	0.44	Small کوچک
درصد سیلت Silt content (%)	8.55E ⁻⁰⁵	2.56E ⁻⁰⁴	0.26	0.14	0.37	0.58	Small کوچک
اسیدیته pH	1.64E ⁻⁰³	2.46E ⁻⁰³	-0.26	-0.37	-0.14	0.35	Small کوچک
درصد آهک TNV (%)	1.33E ⁻⁰⁴	2.81E ⁻⁰⁴	-0.26	-0.37	-0.14	0.54	Small کوچک
روی Zn (mg kg ⁻¹)	1.11E ⁻⁰⁴	2.81E ⁻⁰⁴	0.26	0.14	0.37	0.59	Small کوچک
کلسیم و منیزیم Ca + Mg (meq L ⁻¹)	1.34E ⁻⁰⁴	2.81E ⁻⁰⁴	0.25	0.13	0.37	0.58	Small کوچک
کلسیم Ca (meq L ⁻¹)	8.73E ⁻⁰⁴	1.53E ⁻⁰³	0.22	0.10	0.34	0.53	Small کوچک
منیزیم Mg (meq L ⁻¹)	9.92E ⁻⁰⁴	1.60E ⁻⁰³	0.22	0.10	0.34	0.55	Small کوچک
آهن Fe (mg kg ⁻¹)	1.93E ⁻⁰³	2.70E ⁻⁰³	0.20	0.08	0.32	0.57	Small کوچک
درصد اشباع SP (%)	8.58E ⁻⁰³	1.13E ⁻⁰²	-0.17	-0.29	-0.04	0.55	Small کوچک
هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	3.47E ⁻⁰²	4.29E ⁻⁰²	0.14	0.01	0.26	0.55	Small کوچک
درصد شن Sand content (%)	7.26E ⁻⁰²	8.03E ⁻⁰²	-0.12	-0.24	0.00	0.52	Small کوچک
نسبت جذب سدیم SAR	6.75E ⁻⁰²	7.88E ⁻⁰²	-0.12	-0.24	0.01	0.54	Small کوچک
کلر Cl (meq L ⁻¹)	1.28E ⁻⁰¹	1.34E ⁻⁰¹	0.10	-0.02	0.22	0.48	Small کوچک
سدیم Na (meq L ⁻¹)	9.32E ⁻⁰¹	9.32E ⁻⁰¹	0.01	-0.12	0.13	0.47	Negligible ناچیز



شکل ۲- اندازه اثر تغییرات عمقی ویژگی‌های خاک با استفاده از اثر رتبه‌ای (r_{rb}) و بازه اطمینان ۹۵٪

خطوط عمودی نقطه‌چین و خط‌چین محدوده اثر احتمالی را نشان می‌دهند، نقطه‌ها نشان‌دهنده اندازه اثر واقعی برای هر ویژگی هستند. شکل‌ها شدت اثر را مشخص می‌کنند: دایره = بزرگ، لوزی = متوسط، مثلث = کوچک، مربع = ناچیز.

Figure 2- Depth-wise effect sizes of soil properties expressed as rank-biserial effect size (r_{rb}) with 95% confidence intervals (Vertical dashed and dotted lines indicate reference thresholds for effect interpretation, while the points represent the actual effect size for each variable. Shapes (circle, diamond, triangle, square) indicate effect magnitude: circle = large, diamond = medium, triangle = small, square = negligible.)

اطمینان و تفسیر عملی نتایج در کنار p-value در علوم رفتاری طبیعی و ارائه می‌دهد. از این‌رو، اتکا صرف به معنی‌داری آماری لزوماً بیانگر شدت، پایداری یا اهمیت مدیریتی تغییرات عمقی ویژگی‌های خاک نیست و استفاده از شاخص‌های مکمل نظیر اندازه اثر و عدم قطعیت ضروری به نظر می‌رسد. واسرستاین و همکاران نیز به نقد استفاده صرف از p-value به‌عنوان معیار قطعی برای نتیجه‌گیری آماری پرداخته و توصیه می‌کند که نتایج آماری فقط بر اساس آستانه‌های دلخواه (مثل $p < 0.05$) تعبیر نشوند، بلکه باید اندازه اثر، فواصل اطمینان و زمینه علمی تفسیر شوند و p-value به‌عنوان یک کمیت پیوسته و همراه با دیگر شاخص‌ها ارائه گردد تا از برداشت‌های غلط جلوگیری گردد (Wasserstein et al., 2019).

ترکیب اندازه اثر با شاخص احتمال جهت اثر (جدول ۲) نیز نشان داد که متغیرهای دارای اندازه اثر بزرگ، شواهد احتمالاتی قوی‌تری

در مجموع، مطالعات متعددی به بررسی تغییرات عمقی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پرداخته‌اند. منابع مشابه نشان داده‌اند که بسیاری از عناصر غذایی و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک بین لایه‌های سطحی و زیرسطحی تفاوت معنی‌دار دارند و این تفاوت‌ها معمولاً با آزمون‌های آماری متداول و مقایسه میانگین‌ها گزارش شده‌اند. با این حال، در اغلب این مطالعات، تمرکز اصلی بر معنی‌داری آماری بوده و ارزیابی شدت واقعی، پایداری عمقی و اهمیت مدیریتی این تفاوت‌ها به‌طور نظام‌مند مورد توجه قرار نگرفته است. شایان ذکر است که مقدار p-value به‌شدت تحت تأثیر حجم نمونه قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش تعداد نمونه‌ها، حتی اختلاف‌های بسیار کوچک و از نظر عملکردی کم‌اهمیت نیز می‌توانند از نظر آماری معنی‌دار شوند (Cohen, 1994). مطالعه کلاسیک و طنزآمیز کوهن (۱۹۹۴) با وجود قالب طنزآمیز، تأکیدی جدی بر اهمیت استفاده از اندازه اثر، بازه‌های

برای تمایز عمقی دارند، در حالی که برای متغیرهای پایدار، عدم قطعیت همچنان بالاست. این رویکرد فراتر از p-value، امکان اولویت‌بندی ویژگی‌های خاک از نظر اهمیت مدیریتی را فراهم می‌کند. شاخص PD به‌عنوان شواهد مکمل نشان داد که برای بسیاری از متغیرها، مقادیر آن کمتر از آستانه ۰/۹۵ است. این یافته نشان می‌دهد که اگرچه جهت تغییر عمقی مشخص است، اما عدم قطعیت ذاتی داده‌های خاک همچنان قابل توجه است. به‌طور کلی، این نتایج حاکی از آن است که در خاک‌های نیمه‌خشک و دیم، عناصر غذایی مهم در لایه‌های سطحی تجمع می‌یابند و توزیع عمقی آن‌ها می‌تواند بر روی جذب گیاه و عملکرد محصول تأثیر مستقیم داشته باشد. از دیدگاه کاربردی و ترویجی، شناخت چنین الگوهای عمقی برای تعیین میزان و زمان کاربرد کودها و اصلاح‌کننده‌های خاک حیاتی است، به‌ویژه در سیستم‌های کشاورزی دیم و مناطق کم‌آب که مدیریت منابع خاک و عناصر غذایی اهمیت بسیار بالایی دارد.

تحلیل چندمتغیره: عمق به‌عنوان گرادینانی ضعیف اما معنی‌دار

نتایج آزمون پرمنا (جدول ۳) نشان داد که عمق خاک اثر معنی‌داری بر ترکیب کلی ویژگی‌های خاک دارد، هرچند مقدار ضریب تعیین R^2 کوچک بود. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه عمق یک گرادینان قابل تشخیص است، اما ناهمگنی مکانی و عوامل مدیریتی سهم غالب‌تری در کنترل تغییرپذیری خاک دارند. غیرمعنی‌دار بودن آزمون پرمدیسپ نیز اعتبار نتایج پرمنا را تأیید کرد.

شاخص پایداری عمقی و طبقه‌بندی مدیریتی متغیرهای خاک

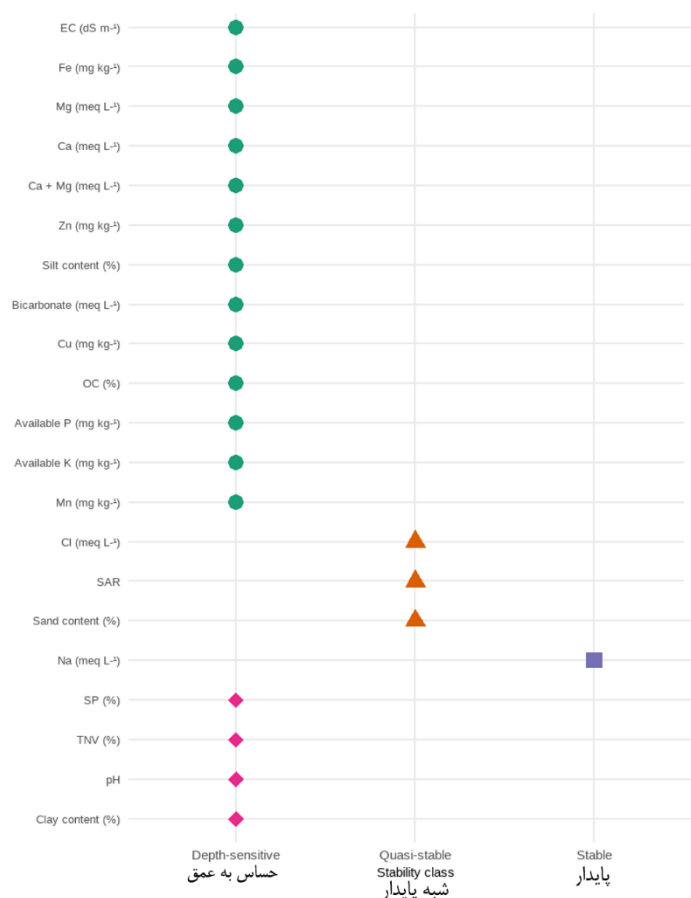
طبقه‌بندی متغیرها بر اساس شاخص پایداری عمقی تصویر کاربردی‌تری از حساسیت واقعی ویژگی‌های خاک ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی شاخص پایداری عمقی نشان داد که ویژگی‌های خاک از نظر شدت و جهت پاسخ به افزایش عمق، رفتارهای کاملاً متمایزی از خود نشان می‌دهند (شکل ۳). این شاخص با اتکا بر اندازه اثر غیرپارامتری و فاصله اطمینان، امکان تفکیک ویژگی‌های پایدار، شبه‌پایدار و حساس به عمق را فراهم کرد و دیدگاهی فراتر از معنی‌داری آماری صرف ارائه داد. بر اساس مقدار مطلق اندازه اثر ($|r_{rb}|$)، متغیرها به چهار گروه طبقه‌بندی شدند که شامل متغیرهای پایدار ($|r| < 0/10$)، با حساسیت کم ($0/30 < |r| < 0/10$)، با حساسیت متوسط

($0/30 < |r| < 0/50$) و با حساسیت زیاد ($|r| > 0/50$) بودند. بر اساس شاخص پایداری عمقی، یون سدیم تنها متغیری بود که در گروه پایدار در امتداد عمق قرار گرفت؛ به‌طوری که اندازه اثر آن ناچیز بوده و فاصله اطمینان نیز تغییرات عمقی معنی‌داری را تأیید نکرد. این الگو بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت سدیم در نیم‌رخ خاک است که می‌تواند ناشی از کنترل آن توسط شرایط ژئوشیمیایی غالب، ترکیب مواد مادری و تعادل‌های تبدیلی در سیستم خاک باشد. در مقابل، متغیرهایی مانند کلر، نسبت جذب سدیم و درصد شن در گروه شبه‌پایدار قرار گرفتند که نشان می‌دهد اگرچه تغییرات عمقی آن‌ها از نظر آماری قابل تشخیص است، اما اندازه اثر محدود آن‌ها بیانگر اهمیت مدیریتی پایین‌تر این تغییرات است. بخش عمده‌ای از ویژگی‌های شیمیایی خاک، از جمله هدایت الکتریکی، کاتیون‌های کلسیم و منیزیم، آهن، روی و بی‌کربنات، در گروه حساس به عمق طبقه‌بندی شدند. این متغیرها عموماً گرایش به تجمع نسبی در لایه‌های زیرسطحی نشان دادند. با این حال، در شرایط اقلیم خشک و نیمه‌خشک، این الگو الزاماً ناشی از شست‌وشوی عمقی فعال نیست، بلکه می‌تواند حاصل برهم‌کنش فرآیندهایی نظیر تخییر بالا، حرکت محدود اما تدریجی محلول خاک، صعود موئینه، و انباشت املاح در افق‌های خاص باشد. بنابراین، تغییرات مشاهده‌شده را باید در چارچوب ویژگی‌های اقلیمی منطقه و دینامیک خاص آب و املاح در خاک‌های خشک تفسیر کرد. در مقابل، برخی ویژگی‌ها از جمله ماده آلی خاک، فسفر و پتاسیم قابل جذب و منگنز، اندازه اثر بزرگ و جهت‌دار نشان دادند و به‌عنوان ویژگی‌های به‌شدت وابسته به لایه سطحی شناسایی شدند. این متغیرها بیشترین حساسیت را نسبت به عمق داشتند و تغییرات آن‌ها عمدتاً بازتاب‌دهنده ورودی‌های زیستی، بقایای گیاهی و فعالیت‌های مدیریتی در لایه‌های سطحی خاک است. از منظر مدیریتی، این ویژگی‌ها مناسب‌ترین شاخص‌ها برای پایش کیفیت خاک و ارزیابی اثر مدیریت سطحی محسوب می‌شوند. ویژگی‌های پایدار یا شبه‌پایدار نیز اولویت کمتری برای مدیریت مبتنی بر عمق دارند و تغییرات آن‌ها را نمی‌توان صرفاً به اثر عمق نمونه‌برداری نسبت داد.

این چارچوب تفسیر مدیریتی مبتنی بر داده، نشان می‌دهد که همه تفاوت‌های آماری الزاماً از نظر عملکردی اهمیت ندارند و تمرکز مدیریت باید بر متغیرهایی با حساسیت واقعی به عمق باشد. این رویکرد چارچوبی کاربردی برای پایش کیفیت خاک، مدیریت کوددهی و ارزیابی پایداری خاک در مقیاس نیم‌رخ فراهم می‌کند.

جدول ۳- نتایج آزمون پرمانوا بر اساس فاصله بری-کور تیس برای بررسی اثر عمق خاک بر الگوی چندمتغیره ویژگی‌های خاک
Table 3- PERMANOVA results based on Bray-Curtis distances evaluating the effect of soil depth on multivariate soil property patterns

عامل Factor	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	ضریب تعیین R ²	آماره شبه F Pseudo-F	مقدار p p-value
عمق خاک Depth	1	0.287	0.00791	5.2146	0.001
باقیمانده Residual	654	35.975	0.99209	—	—
کل Total	655	36.262	1.00000	—	—



شکل ۳- تثبیت عمقی و کلاس‌های مدیریتی متغیرهای خاک

(شکل‌ها نشان‌دهنده کلاس مدیریتی هستند: دایره = تجمع در عمق، مثلث = اولویت کم برای مدیریت عمقی، مربع = پایدار در تمام عمق‌ها، لوزی = کنترل سطحی).

Figure 4- Depth stability and management classes of soil variables

(Shapes indicate management class: circle = accumulating at deeper layer, triangle = low priority for depth-specific management, square = stable across depths, diamond = surface-controlled property).

نتیجه‌گیری

معنی‌داری آماری می‌تواند به برداشت‌های ناقص منجر شود. نتایج بیانگر آن بود که متغیرهایی مانند کربن آلی، فسفر، پتاسیم و منگنز دارای تغییرات عمقی معنی‌دار با اندازه اثر قابل توجه هستند، در حالی که برخی ویژگی‌ها نظیر رس، سیلت، پهاش و آهن از پایداری نسبی در نیم‌رخ برخوردارند. الگوی مشاهده‌شده، به‌ویژه تمرکز عناصر غذایی

این مطالعه با تلفیق تحلیل‌های زوجی، پرمانوا و شاخص‌های اندازه اثر غیرپارامتری، چارچوبی فراتر از مقایسات میانگین برای ارزیابی ناهمگنی عمقی خاک ارائه داد و نشان داد که تفسیر صرف مبتنی بر

را در کل ناحیه ریشه منعکس کند. این یافته‌ها بر ضرورت گذار به مدیریت عمق‌محور خاک و کوددهی هدفمند تأکید دارد؛ رویکردی که می‌تواند با بهبود توزیع عناصر غذایی در نیم‌رخ، کارایی مصرف نهاده‌ها و تاب‌آوری سیستم‌های زراعی در برابر تنش خشکی را افزایش دهد. بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده بر (۱) ارزیابی پاسخ گیاه به مدیریت عمق‌محور کوددهی، به‌ویژه برای فسفر، پتاسیم و منگنز، (۲) بررسی ارتباط بین توزیع عمقی عناصر غذایی و توسعه سیستم ریشه، و (۳) تلفیق داده‌های شیمیایی خاک با شاخص‌های زیستی و فیزیکی در نیم‌رخ خاک متمرکز شوند. همچنین توسعه شاخص‌های ترکیبی مبتنی بر اندازه اثر می‌تواند ابزار مؤثری برای رتبه‌بندی محدودیت‌های عمقی خاک و تدوین توصیه‌های مدیریتی دقیق‌تر در مقیاس مزرعه و منطقه فراهم کند.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی در راستای انجام این پژوهش ابراز می‌دارند. همچنین از همکاری ارزشمند و زحمات کارکنان آزمایشگاه به‌منظور ارائه پشتیبانی فنی صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

در لایه سطحی و فقر نسبی لایه‌های زیرین، بیش از آنکه ناشی از شست‌وشوی عمقی فعال باشد، تحت تأثیر محدودیت حرکت آب در خاک، تبخیر بالا، تجمع سطحی بقایا و ماهیت مدیریت زراعی در شرایط اقلیم خشک شکل گرفته است و بیانگر آن است که کارکرد مؤثر خاک عمداً به عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر محدود شده و لایه‌های زیرین از نظر شیمیایی و زیستی در وضعیت ضعیف‌تری قرار دارند. چنین ساختاری موجب توسعه سطحی سیستم ریشه، کاهش بهره‌برداری گیاه از منابع آب و عناصر غذایی در عمق و افزایش حساسیت سیستم زراعی به تنش خشکی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که پایداری تولید، به‌ویژه در سال‌های کم‌بارش، به‌طور جدی کاهش می‌یابد. دسته‌بندی متغیرها بر اساس حساسیت عمقی و کلاس مدیریتی، امکان اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی و کوددهی را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که توجه ویژه به عناصر با اندازه اثر بزرگ در نیم‌رخ خاک می‌تواند بهره‌وری و پایداری سیستم خاک-گیاه را بهبود بخشد. این یافته‌ها به‌ویژه در کشاورزی دیم و مناطق کم‌آب، مبنای علمی برای طراحی استراتژی‌های هدفمند مدیریت خاک و کوددهی ارائه می‌کنند. نوآوری اصلی این پژوهش در تفکیک بین معنی‌داری آماری و اهمیت عملکردی تغییرات عمقی و ارائه یک طبقه‌بندی مبتنی بر اندازه اثر برای اولویت‌بندی مدیریتی متغیرهای خاک است؛ به‌گونه‌ای که نشان می‌دهد اتکا به نمونه‌برداری سطحی و کوددهی یکنواخت نمی‌تواند وضعیت واقعی حاصلخیزی خاک

References

1. Abbas, A., Hameed, R., Balooch, S., Khattak, W.A., Raza, M.M., Zulfiqar, U., Akbar, R., Malik, U., & Huang, P. (2025). *Manganese dynamics: Effects of pollution and its impact on soil chemistry*. p. 241-257. In S. Saud, S. Fahad, & D. Wang (eds.) *Beneficial elements for remediation of heavy metals in polluted soil*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26522-8.00009-X>
2. Anderson, M.J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral ecology*, 26(1), 32-46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>
3. Anderson, M.J. (2017). Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA) *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 1-15. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07841>
4. Anderson, M.J., & Walsh, D.C. (2013). PERMANOVA, ANOSIM, and the Mantel test in the face of heterogeneous dispersions: what null hypothesis are you testing? *Ecological monographs*, 83(4), 557-574. <https://doi.org/10.1890/12-2010.1>
5. Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological)*, 57(1), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
6. Bernard-Verdier, M., Navas, M.L., Vellend, M., Violle, C., Fayolle, A., & Garnier, E. (2012). Community assembly along a soil depth gradient: contrasting patterns of plant trait convergence and divergence in a Mediterranean rangeland. *Journal of Ecology*, 100(6), 1422-1433. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12003>
7. Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., & McDaniel, P.A. (2011). *Soil genesis and classification*: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470960622>
8. Cohen, J. (1994). The earth is round ($p < 0.05$). *American psychologist*, 49(12), 997. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.49.12.997>
9. Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12(12), 989-994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
10. Cumming, G. (2025). New Statistics, The. In: Lovric, M. (eds) *International Encyclopedia of Statistical Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-69359-9_704
11. Dhakad, R., Kumar, P., & Sharma, C.K. (2020). Status of soil pH, EC, OC and micronutrients levels in Madhya

- Pradesh: An overview. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(5), 14-12. www.phytojournal.com
12. Emamian, A., Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Gholami, A., Opp, C., & Middleton, N. (2021). Assessing vegetation restoration potential under different land uses and climatic classes in northeast Iran. *Ecological Indicators*, 122, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107325>
13. Fiel Peres, F. (2026). Effect sizes for nonparametric tests. *Biochem Med (Zagreb)*, 36(1), 010101. <https://doi.org/10.11613/bm.2026.010101>
14. Getnet, K., Miju, C., Bitew, A., & Atinafu, M. (2025). The Effects of Land Use Types and Soil Depths on Soil Micronutrients, Soil pH, and Organic Carbon in Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2025(1), 5575783. <https://doi.org/10.1155/aess/5575783>
15. Hao, J., Chai, Y.N., Lopes, L.D., Ordóñez, R.A., Wright, E.E., Archontoulis, S., & Schachtman, D.P. (2021). The Effects of Soil Depth on the Structure of Microbial Communities in Agricultural Soils in Iowa, USA. *Appl Environ Microbiol*, 87(4). <https://doi.org/10.1101/2020.03.31.018416>
16. Havlin, J.L. (2014). Soil fertility and nutrient management. p. 460-469. In Y. Wang (ed.), *Encyclopedia of Natural Resources - Land*, vol 1. Boca Raton: CRC Print. <https://doi.org/10.1081/e-enrl-120047493>
17. Jalali, M., Buss, W., Parviznia, F., & Jalali, M. (2023). The status of phosphorus levels in Iranian agricultural soils—a systematic review and meta-analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 842. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11412-5>
18. Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*: Courier Corporation.
19. Kerby, D.S. (2014). The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation. *Comprehensive Psychology*, 3. <https://doi.org/10.2466/11.IT.3.1>
20. Legendre, P., & Legendre, L. (2012). p. 419. *Numerical ecology, Developments in Environmental Modelling*. 3rd Edition, Elsevier, Amsterdam.
21. Makowski, D., Ben-Shachar, M.S., & Lüdtke, D. (2019). bayestestR: Describing effects and their uncertainty, existence and significance within the Bayesian framework. *Journal of Open Source Software*, 4(40), 1541. <https://doi.org/10.21105/joss.01541>
22. Montgomery, D.C. (2017). *Design and analysis of experiments*. p. 640. John Wiley & sons.
23. Nakagawa, S., & Cuthill, I.C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance :a practical guide for biologists. *Biological Reviews*, 82(4), 591-605. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>
24. Okolo, C.C., Gebresamuel, G., Zenebe, A., Haile, M., Orji, J.E., Okebalama, C.B., Eze, C.E., Eze, E., & Eze, P.N. (2023). Soil organic carbon, total nitrogen stocks and CO₂ emissions in top-and subsoils with contrasting management regimes in semi-arid environments. *Scientific Reports*, 13(1), 1117. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-023-28276-x>
25. Oksanen, J. (2015). Vegan: community ecology package. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>, 2, 3.
26. Richter, D.D., & Markewitz, D. (1995). How deep is soil? *BioScience*, 45(9), 600-609. <https://doi.org/10.2307/1312764>
27. Sokal, R.R., & Rohlf, F.J. (1987). *Biostatistics*. Francise & Co, New York, 10, 2088-2092 .
28. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., & Loeppert, R.H . (2020) .*Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*: John Wiley & Sons.
29. Vance, C., Gaston, L., Blazier, M., & Beasley, J. (2024). Loblolly Pine Mid-Rotation Phosphorus Fertilization with Poultry Litter Ash or Triple Superphosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(13), 2000-2008. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2336575>
30. Wasserstein, R.L., & Lazar, N.A. (2016). The ASA Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose. *The American Statistician*, 70(2), 129–133. <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
31. Wasserstein, R.L., Schirm, A.L., & Lazar, N.A. (2019). Moving to a World Beyond “p < 0.05”. *The American Statistician*, 73(sup1), 1-19. <https://doi.org/10.1080/00031305.2019.1583913>
32. Wasserstein, R.L., Schirm, A.L., & Lazar, N.A. (2019). Moving to a world beyond “p< 0.05” (73: 1-19). Taylor & Francis.
33. Webster, R., & Oliver, M.A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*: John Wiley & Sons.
34. Weil, R.R., & Brady, N.C. (2016). *The Nature and Properties of Soils*: 15th Edition, Pearson Education Inc., Columbus.
35. Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Lief, M., & Garcia-Franco, N. (2019) .Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
36. Xu, Z., Lai, T., Li, S., Si, D., & Zhang, C. (2025). Effective potassium management for sustainable crop production based on soil potassium availability. *Field Crops Research*, 326, 109865. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109865>
37. Zhou, W., Han, G., Liu, M., Zeng, J., Liang, B., Liu, J., & Qu, R. (2020). Determining the distribution and interaction of soil organic carbon, nitrogen, pH and texture in soil profiles: a case study in the Lancangjiang River Basin, Southwest China. *Forests*, 11(5), 532. <https://doi.org/10.3390/f11050532>