



Evaluation of Microbial, Biological, and Chemical Soil Characteristics in the Rhizosphere of Pistachio and Jujube Trees in the Orchards of Birjand Plain

Farhad Azarmi-Atajan^{1,✉}

1. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: farhadazarmi@birjand.ac.ir

Submit Date
29 November 2025

Revise Date
18 December 2025

Accept Date
20 December 2025

Keywords:

*Microbial respiration,
Nutrient cycling,
Organic matter,
Salinity,
Soil microorganisms.*

Extended abstract

Introduction

Soil is a living and dynamic component of agricultural ecosystems that provides the foundation for plant growth, nutrient cycling, and food production. Soil quality and performance, shaped by its physical, chemical, and biological properties, are critical factors in determining crop yields (Xing et al., 2025). Soil biological properties include the composition, abundance, and activity of living organisms within the soil, including bacteria, fungi, nematodes, and macroorganisms such as earthworms (Doran and Zeiss, 2000). A diverse and vibrant microbial community can improve the efficiency of nutrient cycling, help control soil-borne diseases, and support plant growth and development (Niu et al., 2020). As a result, assessing soil biological properties has emerged as a valuable tool for assessing soil health and the sustainability of various agricultural systems. Biological indicators such as microbial biomass carbon and nitrogen (MBC), soil respiration, enzyme activities, and microbial community structure help to understand the functional status of agricultural soils (Semenov et al., 2025). Pistachios and jujubes are among the most important agricultural products in South Khorasan Province of Iran, and a large part of the Birjand plain is dedicated to planting these trees, especially jujubes.

Cite this article: Azarmi-Atajan, F. (2025). Evaluation of microbial, biological, and chemical soil characteristics in the rhizosphere of pistachio and jujube trees in the orchards of Birjand plain. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (2), 41-60. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.10603.1134>.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

It is very important to be aware of the various aspects affecting the improvement of the yield and quality of these products, including soil characteristics. Based on the studies conducted, there is no comprehensive and documented information about the characteristics of the soil around the roots of most fruit trees. Therefore, given the importance of understanding soil characteristics in the nutrition management and production of agricultural products, including fruit trees, this study aims to evaluate the chemical and biological characteristics of the soil around the roots of pistachio and jujube trees in the Birjand plain.

Materials and Methods

For this study, after field investigation and regional conditions, 10 pistachio orchards and 10 jujube orchards with mature trees (15 years old) that were similar in terms of variety and appearance in each orchard were selected in the cities of Birjand and Khusf, South Khorasan. Soil sampling was performed in the spring during tree flowering from a depth of 0 to 30 cm and a distance of 30 to 60 cm from the shade of the trees to ensure relative uniformity. Then, some biological and chemical characteristics of the soil were measured, including bacterial population (BP), basal respiration (BR), substrate-induced respiration (SIR), microbial biomass carbon (MBC), pH in saturated soil, electrical conductivity (EC) in saturated extract, organic carbon (OC), and potassium (K) using standard methods. Finally, the data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software. Means were compared using the least significant difference (LSD) test at a probability level of 5%.

Results and Discussion

The results showed that the chemical and biological indices of rhizosphere soil including EC, pH, OC, available K, BP, BR, SIR and MBC varied in the range of 4.28-9.54 dS/m, 7.53-8.20, 0.11-0.51%, 215-340 mg/kg, 1.18×10^5 - 62.1×10^5 CFU/gr.soil, 0.09-0.21 mg CO₂/gr.soil.day, 0.33-1.18 mg CO₂/gr.soil.day and 0.15-1.35 mg C/100 gr. soil for pistachio trees and in the range of 5.41-11.0 dS/m, 7.50-8.2, 0.15-0.39%, 182-270 mg/kg, 0.79×10^4 - 8.40×10^4 CFU/gr.soil, 0.03-0.09 mg CO₂/gr.soil.day, 0.15-0.38 mg CO₂/gr.soil.day and 0.31-0.87 mg C/100 gr. soil for jujube trees, respectively. An inverse relationship between microbial activity (measured by BP, BR, and MBC) and soil salinity is observed, particularly in the jujube rhizospheres. In the case of jujube, soils with higher salinity exhibited lower bacterial populations, respiration rates, and microbial biomass, highlighting the importance of managing salinity levels to maintain soil microbial health and fertility. The results showed that in the jujube rhizosphere, soil salinity alone explained 74–82% of the variation in bacterial population, respiration, and microbial biomass carbon. This very high sensitivity is probably due to the lower organic matter content and lower tolerance of jujube rhizosphere microorganisms to osmotic stress. In the pistachio rhizosphere, this relationship was weaker, which is consistent with the higher tolerance of this species to salinity. Although pistachio (Brar et al., 2022) and jujube (Liu et al., 2019) are known for their salt tolerance, their growth and yield can still be significantly affected under high soil salinity conditions. Low levels of organic carbon and organic matter in both the rhizosphere raise concerns for soil fertility and plant growth in the long term. Organic matter is essential for improving soil structure, water holding capacity, and nutrient retention, and low levels may limit plant growth and soil microbial activity (Lal, 2020). Basal respiration measures the CO₂ released by soil microbial biomass in an unamended soil. This parameter serves as an indicator of overall microbial activity and its value is influenced by factors such as substrate availability, the physiological state of the microbes, and their metabolic needs (Romero-Freire et al., 2016). The relationship between MBC and bacterial population is consistent with previous studies that have shown a positive correlation between microbial biomass and microbial community size (Angst et al., 2021). It is worth noting that MBC was inversely related to soil salinity in both rhizospheres. High salinity often has an inhibitory effect on microbial growth and reduces microbial biomass and activity (Dong et al., 2022). The observed inverse relationship between MBC and

salinity highlights the sensitivity of microbial communities to salinity stress, which can be an important factor in areas where saline soils are prevalent. Environmental stresses such as soil salinity-alkalinity can affect soil-root-microbe interactions (Qu et al., 2022).

Conclusion

A key finding in this study was the inverse relationship between microbial activity (measured by BP, BR, and MBC) and soil salinity, particularly in the jujube rhizosphere. In the case of jujube, soils with higher salinity showed lower bacterial populations, respiration rates, and microbial biomass, highlighting the importance of managing salinity levels to maintain soil microbial health and fertility. In conclusion, this study highlights the important role of organic matter in regulating soil microbial population and activity in the rhizosphere of pistachio and jujube trees. The positive correlation between organic matter content and microbial activity highlights the importance of soil management practices that increase organic matter inputs, such as composting or crop rotation, to improve microbial health and fertility. Furthermore, the observed effect of soil salinity on microbial activity suggests that salinity management is crucial for maintaining soil biological health in areas where saline conditions prevail. In the rhizosphere of jujube trees, increased salinity significantly reduced microbial population and activity compared to pistachio trees. Therefore, salinity management (salt washing, sulfur application, addition of compost or manure) and increasing soil organic matter are the main priorities for nutritional management and sustainability of jujube orchards in saline areas of Birjand plain. It is obvious that further studies and measurements of various soil indices can help in soil management for optimal performance of pistachio and jujube trees.



ارزیابی ویژگی‌های میکروبی، زیستی و شیمیایی خاک در ریزوسفر درختان پسته و عنب در باغات دشت بیرجند

فرهاد آذر می آتاجان^۱ ✉

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

✉ نویسنده مسئول: Farhadazarmi@birjand.ac.ir

چکیده

علیرغم اهمیت آگاهی از ویژگی‌های خاک در تولیدات کشاورزی، اطلاعات مربوط به ویژگی‌های خاک در باغ‌های پسته و عنب محدود است. هدف از این مطالعه ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک اطراف ریشه درختان پسته و عنب در دشت بیرجند است. برای این منظور، نمونه‌های خاک از ناحیه ریزوسفر ۱۰ باغ پسته و عنب در شهرستان‌های بیرجند و خوسف تهیه و ویژگی‌های مختلف آنها از جمله بافت، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، واکنش خاک (pH)، ماده آلی (OC)، پتاسیم قابل جذب (K)، جمعیت باکتریایی (BP)، تنفس پایه (BR)، تنفس برانگیخته (SIR) و کربن زیست توده میکروبی (MBC) با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین شد. نتایج نشان داد که مقدار pH، EC، BP، K، SIR، BR، MBC و ریزوسفر درختان پسته به ترتیب در دامنه ۴/۹-۲۸/۵۴ dS/m، ۷/۸-۵۳/۲۰، ۰/۰-۱۱/۵۱ درصد، ۲۷۰-۱۸۲ mg/kg، ۰/۱-۳۳/۱۸ mg CO₂/g.soil.day و ۰/۰-۰۹/۲۱ mg CO₂/g.soil.day، ۱/۱۸×۱۰^۵-۶۲/۱×۱۰^۵، ۵/۱۱-۴۱/۰ dS/m و در ریزوسفر درختان عنب به ترتیب در دامنه ۵/۱۱-۴۱/۰ dS/m، ۷/۸-۵۰/۲۰، ۰/۰-۱۵/۳۹ درصد، ۳۴۰-۲۱۵ mg/kg، ۰/۰-۱۵/۳۸ mg CO₂/g.soil.day و ۰/۰-۳۱/۸۷ mg C/100 g.soil و ۰/۰-۰۳/۰۹ CO₂/g.soil.day رابطه معکوس بین فعالیت میکروبی (اندازه‌گیری شده توسط BP، BR و MBC) و شوری خاک، به ویژه در ریزوسفر درختان عنب مشاهده شد. نتایج این مطالعه نقش مهم ماده آلی را در تنظیم جمعیت و فعالیت میکروبی خاک در ریزوسفر درختان پسته و عنب را نشان می‌دهد. شناخت ویژگی‌هایی مانند مقدار ماده آلی، جمعیت میکروبی، تنفس و کربن زیست توده، می‌تواند در مدیریت تغذیه درختان پسته و عنب کمک کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

کلیدواژه‌ها:

تنفس میکروبی،

چرخه عناصر غذایی،

ریزجانداران خاک،

شوری،

ماده آلی.

مقدمه

خاک یک جزء زنده و پویا از اکوسیستم‌های کشاورزی است که پایه و اساس رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و تولید غذا را فراهم می‌کند. کیفیت و عملکرد خاک، که توسط خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن شکل می‌گیرد، عوامل حیاتی در تعیین عملکرد محصولات کشاورزی هستند (Xing et al., 2025). در حالی که به‌طور سنتی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بیشترین توجه را در تحقیقات کشاورزی به خود جلب کرده است، اکنون خواص زیستی آن نیز به همان اندازه برای حفظ حاصلخیزی و بهره‌وری طولانی مدت خاک حیاتی شناخته شده‌اند.

ویژگی‌های زیستی خاک شامل ترکیب، فراوانی و فعالیت موجودات زنده درون خاک، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها، نماتدها و درشت جانداران مانند کرم‌های خاکی می‌شود (Doran and Zeiss, 2000). این موجودات زنده عملکردهای حیاتی اکوسیستم مانند معدنی شدن مواد غذایی، تثبیت نیتروژن، آزادسازی عناصر غذایی از ترکیبات نامحلول و تشکیل خاکدانه‌های پایدار خاک را انجام می‌دهند. علاوه بر این، ریزجانداران خاک مواد آلی را تجزیه می‌کنند و دی اکسید کربن آزاد می‌کنند، ضمن اینکه به ترسیب کربن در خاک نیز کمک می‌کنند و در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارند (Raza et al., 2023). این ریزجانداران همچنین هورمون‌های رشدی مانند اسید جاسمونیک و جیبرلین تولید می‌کنند که رشد ریشه را تحریک کرده و سطح ریشه برای جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهند (de Andrade et al., 2023). این موجودات از طریق روابط همزیستی با قارچ‌های میکوریزا، جذب عناصر غذایی ضروری مانند فسفر و نیتروژن را از خاک افزایش می‌دهند و در نتیجه راندمان استفاده از عناصر غذایی را بهبود می‌بخشند (Mitra et al., 2023). ریزجانداران همچنین می‌توانند با انحلال

فسفات‌های نامحلول، آن‌ها را به اشکالی تبدیل کنند که گیاهان به راحتی می‌توانند جذب کنند. تولید اسیدهای آلی و پروتون‌ها توسط باکتری‌های حل‌کننده فسفات، ترکیبات فسفات نامحلول را حل می‌کند و در نتیجه، فسفر موجود در دسترس گیاه را افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2025). از سوی دیگر، فعالیت میکروبی با تولید مواد پلیمری خارج سلولی و تسهیل اتصال ذرات خاک، به تشکیل و تثبیت خاکدانه‌ها کمک می‌کند. این خاکدانه‌ها با افزایش فضای منافذ، تهویه و حفظ آب، ساختمان خاک را بهبود می‌بخشند که همگی برای رشد ریشه و حرکت مواد غذایی ضروری هستند (Philippot et al., 2024). یک جامعه میکروبی متنوع و زنده می‌تواند کارایی چرخه عناصر را بهبود بخشد، به کنترل بیماری‌های خاکزاد کمک کرده و از رشد و نمو گیاه حمایت کند (Niu et al., 2020). در نتیجه، ارزیابی ویژگی‌های زیستی خاک به عنوان ابزاری ارزشمند برای ارزیابی سلامت خاک و پایداری سیستم‌های مختلف کشاورزی پدیدار شده است. شاخص‌های زیستی مانند کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBC)، تنفس خاک، فعالیت‌های آنزیمی و ساختار جامعه میکروبی، به شناخت وضعیت عملکردی خاک‌های کشاورزی کمک می‌کند (Semenov et al., 2025). این شاخص‌ها اغلب سریع‌تر از پارامترهای فیزیکی یا شیمیایی به تغییرات در مدیریت و شرایط محیطی پاسخ می‌دهند و همین امر آنها را به سیگنال‌های هشدار دهنده اولیه مؤثری در مورد تخریب یا بهبود خاک تبدیل می‌کند (Ma et al., 2022). زیست‌توده میکروبی خاک، یک مخزن پویای مواد مغذی در لایه‌های خاک است که شامل باکتری‌ها، اکتینومیسست‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، تک‌سلولی‌ها و سایر ریزجانداران خاک می‌شود. همچنین، این زیست‌توده، میزان تغییرات بیوشیمیایی رخ داده در لایه‌های خاک با سطوح بالاتر مواد آلی ناپایدار خاک را نشان می‌دهد که به عنوان مخزنی از مواد مغذی گیاه عمل

می‌کند (Semenov et al., 2025). همراه با تنفس خاک، MBC به عنوان یکی از رایج‌ترین شاخص‌های میکروبیولوژیکی برای ارزیابی سلامت و کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شود (Bunemann et al., 2018). بخش قابل توجهی از کربن آلی خاک می‌تواند منشأ میکروبی داشته باشد. از سوی دیگر، به دلیل نقش زیست توده میکروبی خاک در تبدیل مواد آلی، سطوح بالاتر MBC عموماً با خاک‌های سالم‌تر و حاصلخیزتر مرتبط است (Angst et al., 2021).

ریزوسفر، ناحیه باریکی از خاک که تحت تأثیر ریشه‌های گیاه قرار دارد، نقش محوری در تعیین کیفیت خاک، عملکرد و رشد گیاه ایفا می‌کند (Solomon et al., 2024). این ناحیه پویا، مکانی با فعالیت‌های زیستی شدید است که در آن تعاملات بین ریشه‌های گیاه، ریزجانداران و ذرات خاک، طیف وسیعی از فرآیندهای اساسی، از جمله جذب عناصر غذایی، حفظ ساختمان خاک و سرکوب بیماری‌ها را کنترل می‌کند (Lecomte et al., 2018). مدیریت مؤثر ریزوسفر می‌تواند حاصلخیزی خاک را افزایش داده و بهره‌وری محصول را بهبود بخشد و با به حداقل رساندن نیاز به نهاده‌های شیمیایی و تقویت اکوسیستم خاک، به شیوه‌های کشاورزی پایدار کمک کند (Kumar and Verma, 2019). نتایج مطالعات یوان و همکاران نشان داد که تأثیر ریزوسفر بر خواص شیمیایی و زیستی خاک بسته به زمان نمونه‌برداری، گونه‌های گیاهی و اشکال زیستی گیاهان متفاوت است (Yuan et al., 2020).

پسته و عناب از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در استان خراسان جنوبی ایران بوده و بخش عمده‌ای از دشت بیرجند به کاشت این درختان بویژه عناب، اختصاص یافته است. آگاهی از جنبه‌های مختلف مؤثر بر بهبود عملکرد و کیفیت این محصولات، از جمله ویژگی‌های خاک، بسیار مهم است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، اطلاعات جامع

و مستندی در مورد خصوصیات خاک اطراف ریشه اکثر درختان میوه وجود ندارد. بنابراین، با توجه به اهمیت شناخت از خصوصیات خاک در مدیریت تغذیه و تولید محصولات کشاورزی از جمله درختان میوه، هدف از این مطالعه ارزیابی خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک اطراف ریشه درختان پسته و عناب در دشت بیرجند است.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

برای این مطالعه، پس از بررسی میدانی و شرایط منطقه، ۱۰ باغ پسته و ۱۰ باغ عناب با درختان بالغ (۱۵ ساله) که از نظر رقم و شکل ظاهری در هر باغ شبیه هم بودند، در شهرستان‌های بیرجند و خوسف خراسان جنوبی انتخاب شدند. همچنین از هر باغ، ۳ درخت با ظاهر مشابه انتخاب شدند. در انتخاب باغات و درختان درون هر باغ، سعی شد تا جای ممکن پراکندگی باغات رعایت شده و درختان انتخاب شده کل ظاهری و مدیریت مشابهی داشته باشند. برای این منظور از تجربه باغداران نیز استفاده گردید.

نمونه‌برداری خاک

نمونه‌برداری خاک در فصل بهار هنگام گلدهی درختان از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر و فاصله ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری از سایه انداز درختان انجام شد تا یکنواختی نسبی تأمین شود. برای تهیه نمونه‌ها، خاک سطحی اطراف درختان کنار زده شده و چاله حفر شد. پس از مشاهده ریشه‌های موپین درختان با حجم و مقدار کافی، خاک به همراه ریشه‌ها جمع‌آوری شد. نمونه‌های خاک از محل جوی‌های آبیاری برداشت شد تا بیشترین مقدار ریشه‌ها حاصل شود. نمونه‌ها بلافاصله پس از جمع‌آوری به آزمایشگاه خاک منتقل و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ تا ۶ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

تعیین ویژگی‌های شیمیایی خاک

برای این منظور، ابتدا بخشی از نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده، هوا خشک شده و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک، شامل pH در خاک اشباع با الکتروود شیشه‌ای، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع با دستگاه EC متر، کربن آلی (OC) با روش اکسیداسیون مرطوب واکلی-بلک و پتاسیم (K) با دستگاه فلیم فتومتر (C 620)، بر اساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (Sparks, 1996).

تعیین ویژگی‌های زیستی خاک

جمعیت کل باکتری‌ها

تعداد باکتری‌های خاک با استفاده از تکنیک پخش رقت در پلیت تعیین شد. برای این منظور، ۱۰ گرم خاک وزن شده و به ۹۰ میلی‌لیتر محلول استریل ۰/۹ درصد کلرید سدیم منتقل و به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شد. سپس، سری‌های رقت ده دهی تهیه و روی محیط کشت NA^1 کشت داده شدند. پلیت‌ها به مدت یک هفته در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند و در نهایت جمعیت باکتری‌های خاک بر حسب تعداد کلنی در هر گرم خاک خشک تعیین شد (Azarmi et al., 2015).

اندازه‌گیری تنفس پایه (BR) و تنفس برانگیخته (SIR)

برای تعیین BR در خاک، یک نمونه خاک توزین و با رطوبت تقریبی ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه در یک ظرف دهانه گشاد حاوی سود (NaOH) ۰/۲۵ نرمال قرار داده شده، درزهای آن بطور کامل بسته و به مدت ۷ روز انکوبه شد. پس از آن NaOH واکنش نداده با افزودن چند قطره فنل فتالین به عنوان شناساگر، با استفاده از HCl ۰/۱ نرمال تیترا شد (Anderson et al., 1982). برای

اندازه‌گیری SIR، همانند روش بالا عمل شد، با این تفاوت که نمونه خاک قبل از انکوباسیون با ۱ درصد گلوکز تیمار شد (Alef and Nannipieri, 1995). در نهایت، BR و SIR خاک بر حسب میلی‌گرم CO_2 تولید شده در هر گرم خاک در روز محاسبه شد.

تعیین کربن زیست توده میکروبی (MBC)

کربن زیست توده میکروبی با روش تدخین-استخراج (Jenkinson and Ladd, 1981) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، دو نمونه خاک از هر تیمار وزن شده و جداگانه در دسیکاتور قرار داده شدند. کلروفرم در یکی از دسیکاتورها قرار داده شد و به مدت ۲۴ ساعت گازدهی شد. نمونه بدون کلروفرم به مدت مشابه در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شد. سپس، نمونه‌ها با سولفات پتاسیم ۰/۵ مولار مخلوط شده و به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. در نهایت، مقدار کربن آلی در عصاره‌های فیلتر شده با روش والکی-بلک (Walkey-Black, 1954) اندازه‌گیری شد و کربن زیست توده میکروبی با استفاده از ضریب تبدیل k_{EC} ۰/۴۵ و بر حسب میلی‌گرم کربن زیست توده در هر ۱۰۰ گرم خاک خشک از کربن آلی استخراج شده در دو نمونه گزارش شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک با استفاده از نرم افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج

خواص شیمیایی خاک در ریزوسفر درختان پسته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تغییرات برخی از خصوصیات شیمیایی خاک شامل EC، pH ($p \leq 0.01$)، OC

، OM و K ($p \leq 0.05$) در ریزوسفر درختان پسته معنی‌دار بود (جدول ۱).

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه‌گیری شده (خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک)

Table 1. Analysis of variance (mean of square) for measured traits (soil chemical and biological properties)

منبع تغییرات	درجه آزادی	پسته Pistachio					عناب Jujube				
SOV	df										
خصوصیات شیمیایی Chemical Properties											
		EC	pH	OC	OM	K	EC	pH	OC	OM	K
تیمار Treat	9	10.5**	0.11*	0.056**	0.17*	5102*	10.4**	0.16**	0.018**	0.054**	2696**
خطا Error	20	0.054	0.041	0.004	0.014	1696	0.25	0.009	0.005	0.014	1067
ضریب تغییرات CV (%)		3.50	2.58	20.9	21.0	15.5	6.04	1.25	26.3	26.4	15.2
خصوصیات زیستی Biological Properties											
		BP	BR	SIR	MBC		BP	BR	SIR	MBC	
تیمار Treat	9	1665**	0.007**	0.19**	0.47**		21.9**	0.001**	0.10**	0.10**	
خطا Error	20	89.9	0.0001	0.002	0.007		0.52	0.0001	0.0008	0.001	
ضریب تغییرات CV (%)		39.0	8.39	7.47	10.7		20.3	23.1	10.5	7.03	

SOV: منبع تغییرات، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، OC: کربن آلی، OM: مواد آلی، K: پتاسیم، BP: جمعیت باکتری‌ها، BR: تنفس پایه، SIR: تنفس برانگیخته، MBC: کربن زیس توده میکروبی.

SOV: Source of Variation; EC: Electrical Conductivity; OC: Organic Carbon; OM: Organic Matter; K: Potassium; BP: Bacterial population; BR: Basal Respiration; SIR: Substrate-induced Respiration; MBC: Microbial Biomass Carbon.

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

مطالعه دارای مقدار pH بین ۷/۵۰ تا ۸/۰۰ و ۲۰ درصد از خاک‌ها دارای مقدار pH بیشتر از ۸/۰۰ بودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که همه خاک‌ها دارای ماده آلی کمتر از یک درصد بودند. کمترین مقدار کربن آلی و ماده آلی در خاک ریزوسفری درختان پسته به ترتیب برابر ۰/۱۱ و ۰/۱۹ درصد بود. همچنین بیشترین درصد کربن آلی و ماده آلی به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۸۸ درصد و متعلق به خاک شماره ۵ بود. مقدار کربن آلی و ماده آلی در خاک شماره ۵ (بالاترین درصد) با ۶۰ درصد خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت. میانگین کربن آلی و ماده آلی در این خاک‌ها به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۵۷ درصد بود. از سوی دیگر، ۹۰ درصد خاک‌ها دارای کربن آلی کمتر از ۰/۵ درصد و ۴۰ درصد

طبق نتایج، شوری خاک (EC) در خاک ریزوسفری درختان پسته از ۴/۲۸ تا ۹/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود. بیشترین مقدار EC خاک مربوط به خاک شماره ۹ و کمترین آن مربوط به خاک شماره ۱ بود. همچنین، ۴۰ درصد از خاک‌های مورد مطالعه دارای شوری در محدوده ۴-۶، ۳۰ درصد در محدوده ۸-۶ و ۳۰ درصد در محدوده ۸-۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بودند (جدول ۲). واکنش (pH) خاک‌های مورد مطالعه در ریزوسفر پسته در محدوده بازی بود و بین ۷/۵۳ تا ۸/۲۰ متغیر بود. بیشترین مقدار pH خاک مربوط به خاک شماره ۱ و کمترین آن مربوط به خاک شماره ۹ بود. هشتاد درصد از خاک‌های مورد

مقدار پتاسیم در خاک ریزوسفر درختان پسته ۲۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود. با این حال، نتایج نشان داد که تنها ۳۰ درصد خاک‌ها پتاسیم بیشتر از ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم و ۶۰ درصد پتاسیم بیشتر از ۲۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم داشتند (جدول ۲).

خاک‌ها دارای ماده آلی کمتر از ۰/۵ درصد بودند (جدول ۲). بر اساس نتایج، بیشترین مقدار پتاسیم قابل جذب خاک ۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم بود که با ۶۰ درصد خاک‌ها تفاوت معنی داری داشت. کمترین مقدار پتاسیم خاک ۲۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود که با ۷۰ درصد خاک‌ها تفاوت معنی داری نداشت. همچنین، میانگین

جدول ۲. مقایسه میانگین برخی خصوصیات شیمیایی خاک در ریزوسفر درختان پسته

Table 2. Mean comparison of some soil chemical properties measured in the pistachio rhizosphere

شماره خاک Soil number	بافت Texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)	واکنش pH	کربن آلی OC (%)	مواد آلی OM (%)	پتاسیم K(mg/kg)
1	Sandy Loam	60	32	8	4.28 g	8.20 a	0.34 cd	0.59 cd	340 a
2	Loam	47	39	14	6.51 d	7.90 a-c	0.21 ef	0.36 ef	241 bc
3	Sandy Loam	58	33	9	4.92 f	8.00 ab	0.42 a-c	0.72 a-c	269 bc
4	Loam	48	41	11	8.49 b	7.80 b-d	0.11 f	0.19 f	220 c
5	Loam	49	36	15	6.12 d	7.93 a-c	0.51 a	0.88 a	252 bc
6	Loam	39	40	21	9.22 a	7.61 cd	0.38 c	0.66 bc	227 c
7	Loam	42	23	34	7.19 c	7.83 b-d	0.41 a-c	0.71 a-c	301 ab
8	Sandy Loam	63	21	16	4.96 f	8.00 ab	0.24 de	0.41 de	281 a-c
9	Loam	44	30	26	9.54 a	7.54 d	0.49 ab	0.84 ab	215 c
10	Sandy Loam	56	29	15	5.62 e	7.90 a-c	0.18 ef	0.31 ef	302 ab

برای هر پارامتر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی داری ($p \leq 0.05$) براساس آزمون LSD ندارند.

For each parameter, values followed by the same letter are not significantly different ($p \leq 0.05$) according to the LSD test.

کمترین تعداد باکتری‌ها مربوط به خاک شماره ۲ بود که با ۵۰ درصد خاک‌ها تفاوت معنی داری داشت. میزان ماده آلی در این خاک‌ها نیز کمتر از میانگین خاک‌های مورد مطالعه بود. میانگین جمعیت باکتری‌ها در خاک ریزوسفر درختان برابر با $24/3 \times 10^5$ CFU/g soil بود (جدول ۳). بر اساس نتایج، مقدار BR و SIR در خاک‌های مورد مطالعه نسبتاً کم بود. با این حال، با توجه به مقدار کم مواد آلی در این خاک‌ها، این نتایج دور از انتظار نیست. نتایج نشان داد که میانگین BR و SIR در خاک‌ها به ترتیب ۰/۱۴ تا ۰/۶۷ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز بود. بیشترین مقدار این شاخص‌ها به ترتیب برابر ۰/۲۱ و

ویژگی‌های زیستی خاک در ریزوسفر درختان پسته طبق نتایج تجزیه واریانس، تغییرات برخی از ویژگی‌های زیستی خاک شامل SIR، BR، BP و MBC ($p \leq 0.01$) در ریزوسفر درختان پسته معنی دار بود (جدول ۱).

نتایج نشان داد که جمعیت کل باکتری‌ها در ریزوسفر درختان پسته در محدوده $1/18 \times 10^5$ CFU/g soil تا $62/1 \times 10^5$ CFU/g soil متغیر بود. بیشترین مقدار این شاخص مربوط به خاک شماره ۹ بود که با خاک‌های شماره ۷ و ۵ تفاوت معنی داری نداشت. طبق نتایج، بیشترین جمعیت باکتری‌ها در خاک‌هایی مشاهده شد که درصد ماده آلی بالاتری نیز داشتند. از سوی دیگر،

نتایج نشان داد که مقدار MBC در ریزوسفر درختان پسته در محدوده ۰/۱۵ تا ۱/۳۵ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک متغیر بود. بیشترین مقدار MBC متعلق به خاک شماره ۷ بود که با سایر نمونه‌های خاک اختلاف معنی‌داری داشت. همچنین کمترین مقدار این پارامتر متعلق به خاک شماره ۴ بود که با سایر خاک‌ها اختلاف معنی‌داری داشت. میانگین MBC در خاک‌های مورد مطالعه ۰/۷۷ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک بود. طبق نتایج، ۴۰ درصد خاک‌ها دارای مقدار MBC ۱ تا ۱/۳۵ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک بودند. همچنین، ۳۰ درصد خاک‌ها دارای میزان MBC کمتر از ۰/۵ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک بودند. طبق نتایج، رابطه مستقیمی بین MBC و جمعیت باکتری‌های موجود در خاک وجود داشت. بیشترین میزان MBC مربوط به خاک‌هایی با جمعیت میکروبی بالا بود (جدول ۳).

۱/۱۸ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز و کمترین مقادیر به ترتیب برابر ۰/۰۹ و ۰/۳۳ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز بود. بیشترین مقدار BR مربوط به خاک‌های شماره ۵ و ۹ بود که با سایر خاک‌ها اختلاف معنی‌داری داشت. همچنین، بالاترین مقدار SIR مربوط به خاک شماره ۵ بود که از نظر آماری با سایر خاک‌های مورد مطالعه متفاوت بود. همانطور که انتظار می‌رفت، جمعیت باکتری‌ها و مواد آلی نیز در این خاک‌ها بیشتر از سایر خاک‌ها بود. طبق نتایج، ۵۰ درصد از خاک‌های مورد مطالعه دارای BR کمتر از ۰/۱۵ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز و ۵۰ درصد از خاک‌ها دارای تنفس ۰/۱۵ تا ۰/۲۱ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز بودند. همچنین، ۳۰ درصد از خاک‌ها دارای SIR کمتر از ۰/۵ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز، ۶۰ درصد از خاک‌ها دارای SIR ۰/۵ تا ۱ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز و تنها ۱۰ درصد دارای SIR بیش از ۱ میلی گرم CO₂ در گرم خاک روز بودند (جدول ۳).

جدول ۳. مقایسه میانگین برخی خصوصیات زیستی اندازه‌گیری شده در ریزوسفر درختان پسته

Table 3. Mean comparison of some soil biological properties measured in the pistachio rhizosphere

شماره خاک Soil number	جمعیت باکتری‌ها BP × 10 ⁵ (CFU/gr soil)	تنفس پایه BR (mg CO ₂ /gr soil.day)	تنفس برانگیخته SIR (mg CO ₂ /gr soil.day)	کربن زیست توده میکروبی MBC (mg C _{mic} /100 gr soil)
1	5.77 cd	0.11 d	0.86 b	0.84 d
2	1.81 d	0.10 de	0.48 fg	0.40 f
3	30.5 b	0.16 c	0.64 e	1.04 bc
4	5.21 cd	0.09 e	0.41 gh	0.15 g
5	54.9 a	0.21 a	1.18 a	1.02 bc
6	21.3 bc	0.18 b	0.50 f	0.91 cd
7	50.1 a	0.18 b	0.72 de	1.35 a
8	7.10 cd	0.11 d	0.81 bc	0.54 e
9	62.1 a	0.21 a	0.75 cd	1.12 b
10	4.19 d	0.10 de	0.33 h	0.29 f

برای هر پارامتر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی‌داری (p≤0.05) براساس آزمون LSD ندارند.

For each parameter, values followed by the same letter are not significantly different (p≤0.05) according to the LSD test.

نتایج نشان داد که شوری (EC) در خاک ریزوسفر عناب بیشتر از خاک ریزوسفر پسته بود. میانگین شوری در خاک ریزوسفر عناب ۸/۲۴ دسی‌زیمنس بر متر بود که تقریباً ۲۳ درصد بیشتر از شوری در خاک ریزوسفر پسته

ویژگی‌های شیمیایی خاک در ریزوسفر درخت عناب طبق نتایج تجزیه واریانس، تغییرات ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل EC، pH، OC، OM و K (p≤0.01) در ریزوسفر درختان عناب معنی‌دار بود (جدول ۱).

بیشترین میزان کربن آلی در این خاک‌ها، ۰/۳۹ درصد، متعلق به خاک شماره ۳ بود و با ۶۰ درصد خاک‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری داشت. کمترین مقدار کربن آلی نیز متعلق به خاک شماره ۲ بود. مقدار ماده آلی این خاک‌ها نیز در محدوده ۰/۲۶ تا ۰/۶۷ درصد متغیر بود. بر اساس نتایج، ۴۰ درصد از خاک‌های مورد بررسی دارای ماده آلی بین ۰/۲ تا ۰/۴ درصد، ۴۰ درصد بین ۰/۴ تا ۰/۶ درصد و ۲۰ درصد بین ۰/۶ تا ۰/۸ درصد بودند (جدول ۴).

نتایج نشان داد که مقدار پتاسیم قابل دسترس در خاک ریزوسفری درختان عنب از ۱۷۹ تا ۲۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بوده و به طور متوسط ۲۱۴ میلی گرم بر کیلوگرم بوده است. طبق نتایج، میانگین این پارامتر در خاک ریزوسفری درختان پسته ۲۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود. بیشترین مقدار پتاسیم خاک مربوط به خاک شماره ۳ (۲۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بود که با ۵۰ درصد خاک‌ها اختلاف معنی‌داری داشت. کمترین مقدار این عنصر غذایی مربوط به خاک شماره ۵ بود. طبق نتایج، مقدار پتاسیم قابل دسترس در ۴۰ درصد خاک‌های مورد مطالعه کمتر از ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم بود. همچنین، تنها ۱۰ درصد از این خاک‌ها پتاسیم بیش از ۲۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم داشتند (جدول ۴).

بود. بیشترین EC در خاک شماره ۵ (۱۱) دسی‌زیمنس بر متر بود که با سایر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت. همچنین، کمترین EC در ریزوسفر عنب در خاک شماره ۹ (۵/۴۱) دسی‌زیمنس بر متر بود که با سایر خاک‌ها به جز خاک شماره ۳ تفاوت معنی‌داری داشت. طبق نتایج، ۷۰ درصد از خاک‌های مورد بررسی دارای EC بین ۷ تا ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر و ۳۰ درصد از خاک‌ها دارای EC بین ۵ تا ۷ دسی‌زیمنس بر متر بودند (جدول ۴). نتایج نشان داد که pH خاک در ریزوسفر درختان عنب از ۷/۵۰ تا ۸/۲۰ متغیر بود. همچنین ۳۰ درصد از خاک‌ها دارای pH بالاتر از ۸/۰۰ بودند و pH ۷۰ درصد از خاک‌های مورد مطالعه بین ۷/۵۰ تا ۸/۰۰ بود. میانگین pH خاک در این خاک‌ها ۷/۸۲ بود که ۰/۰۵ واحد کمتر از مقدار این پارامتر در ریزوسفر درختان پسته بود. بیشترین مقدار pH خاک مربوط به خاک‌های شماره ۳ و ۹ و کمترین مقدار این شاخص مربوط به خاک‌های شماره ۱ و ۵ بود (جدول ۴).

براساس نتایج، مقدار کربن آلی در ریزوسفر درختان عنب بسیار کم و کمتر از ۰/۴ درصد بود. مقدار کربن آلی در خاک ریزوسفر درختان عنب از ۰/۱۵ تا ۰/۳۹ درصد متغیر بود. میانگین مقدار کربن آلی در خاک ریزوسفر درختان عنب ۰/۲۶ درصد بود، در حالی که میزان این شاخص در ریزوسفر درختان پسته ۰/۳۳ درصد بود.

جدول ۴. مقایسه میانگین برخی خصوصیات شیمیایی خاک در ریزوسفر درختان عنب

Table 4. Mean comparison of some soil chemical properties measured in the jujube rhizosphere

شماره خاک Soil number	بافت Texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	واکنش pH	کربن آلی OC (%)	مواد آلی OM (%)	پتاسیم K(mg/kg)
1	Loam	33	43	24	10.1 b	7.50 f	0.22 c-e	0.38 c-e	191 b-d
2	Loam	36	45	19	9.71 bc	7.80 de	0.15 e	0.26 e	182 cd
3	Loamy Sandy	57	33	10	5.70 h	8.20 a	0.39 a	0.67 a	270 a
4	Loam	47	41	12	8.63 de	7.69 e	0.18 de	0.31 de	243 ab
5	Loam	41	34	25	11.0 a	7.51 f	0.25 b-e	0.43 b-	179 d

6	Sandy Loam	67	26	7	6.9 g	8.00 bc	0.26 b-e	0.45 b-e	201 b-d
7	Sandy Loam	66	24	10	7.55 fg	7.91 cd	0.20 c-e	0.35 ce	219 a-d
8	Sandy Loam	62	23	15	8.14 ef	7.80 de	0.28 a-d	0.49 a-d	194 b-d
9	Loamy Sand	70	26	5	5.41 h	8.10 ab	0.36 ab	0.63 ab	237 a-c
10	Loam	43	36	21	9.25 cd	7.72 e	0.31 a-c	0.54 ac	228 a-d

برای هر پارامتر، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه اختلاف معنی‌داری ($p \leq 0.05$) براساس آزمون LSD ندارند.

For each parameter, values followed by the same letter are not significantly different ($p \leq 0.05$) according to the LSD test.

ویژگی‌های زیستی خاک در ریزوسفر درختان عناب

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تغییرات برخی از ویژگی‌های زیستی خاک شامل SIR، BR، BP و MBC ($p \leq 0.01$) در ریزوسفر درختان عناب معنی‌دار بود (جدول ۱).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که میزان BP در ریزوسفر درختان عناب کمتر از ریزوسفر درختان پسته بود. پایین بودن BP در ریزوسفر درختان عناب مربوط به مقدار کم مواد آلی و شوری بالای این خاک‌ها است. طبق نتایج، بالاترین BP در ریزوسفر عناب CFU/g soil $8/4 \times 10^4$ و متعلق به خاک شماره ۹ بود که به جز خاک شماره ۳ با سایر خاک‌ها تفاوت آماری معنی‌داری داشت. کمترین مقدار این شاخص CFU/g soil $0/79 \times 10^4$ (مربوط به خاک شماره ۴) بود که با ۶۰ درصد از نمونه‌های خاک تفاوت آماری معنی‌داری داشت. همچنین میانگین BP در ریزوسفر درختان عناب CFU/g soil $3/55 \times 10^4$ بود. جمعیت باکتری‌ها با مقدار مواد آلی رابطه مستقیم و با شوری خاک رابطه معکوس داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که میزان BR در خاک ریزوسفری درختان عناب بسیار پایین و در محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۰۹ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز متغیر بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین میزان BR مربوط به خاک شماره ۹ بود که به جز خاک‌های ۳ و ۱۰ با سایر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت. از سوی دیگر، کمترین مقدار این

پارامتر مربوط به خاک‌های شماره ۲ و ۴ بود که تنها با ۴۰ درصد از خاک‌ها از نظر آماری متفاوت بودند. میانگین میزان BR در خاک‌های مورد مطالعه ۰/۰۶ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز بود که با میزان کم مواد آلی در این خاک‌ها مطابقت دارد. همچنین میزان SIR در ریزوسفری درختان عناب کمتر از ۰/۴۰ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز و حداکثر آن ۰/۳۸ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز بود. تنها ۴۰ درصد از خاک‌ها میزان SIR بیشتر از ۰/۳ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز داشتند. طبق نتایج، ۵۰ درصد خاک‌ها مقدار SIR بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز و ۱۰ درصد خاک‌ها مقدار SIR کمتر از ۰/۲ میلی گرم CO_2 در گرم خاک روز داشتند. بیشترین مقدار SIR مربوط به خاک‌های ۳ و ۹ و کمترین میزان مربوط به خاک شماره ۱ بود (جدول ۵). نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار MBC در خاک ریزوسفری درختان عناب در محدوده ۰/۲۶ تا ۰/۸۷ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک متغیر بود. بیشترین مقدار این پارامتر مربوط به خاک شماره ۶ بود و با سایر خاک‌ها تفاوت آماری معنی‌داری داشت. کمترین مقدار MBC مربوط به خاک شماره ۱ بود که به جز خاک شماره ۴ با سایر خاک‌ها تفاوت آماری معنی‌داری داشت. طبق نتایج، ۴۰ درصد خاک‌ها دارای MBC بیشتر از ۰/۵ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک بودند. همچنین ۵۰ درصد خاک‌ها دارای MBC ۰/۳ تا ۰/۴ میلی گرم کربن در

۱۰۰ گرم خاک بودند. میانگین مقدار MBC در خاک ریزوسفری درختان عنب ۰/۴۹ میلی گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک بود. به طور کلی، تغییرات این شاخص در خاک‌ها با ماده آلی روند مستقیم و با شوری خاک روند

معکوس داشت. همچنین، رابطه مستقیمی بین MBC و جمعیت میکروبی و تنفس در خاک‌های مورد تجزیه و تحلیل مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین برخی خصوصیات زیستی اندازه‌گیری شده در ریزوسفر درختان عنب

Table 5. Mean comparison of some soil biological properties measured in the jujube rhizosphere

شماره خاک Soil number	جمعیت باکتری‌ها BP × 10 ⁵ (CFU/gr soil)	تنفس پایه BR (mg CO ₂ /gr soil.day)	تنفس برانگیخته SIR (mg CO ₂ /gr soil.day)	کربن زیست توده میکروبی MBC (mg C _{mic} /100 gr soil)
1	1.66 de	0.04 cd	0.15 f	0.26 f
2	0.91 e	0.03 d	0.23 de	0.39 e
3	7.19 a	0.08 a	0.38 a	0.59 c
4	0.79 e	0.03 d	0.21 e	0.31 f
5	2.79 cd	0.05 cd	0.22 e	0.55 c
6	4.01 c	0.05 cd	0.31 bc	0.87 a
7	1.08 e	0.06 bc	0.21 e	0.39 e
8	3.21 c	0.05 cd	0.27 cd	0.41 de
9	8.40 a	0.09 a	0.38 a	0.67 b
10	5.50 b	0.08 ab	0.35 ab	0.46 d

برای هر پارامتر، میانگین‌های دارای یک حرف مشابه اختلاف معنی‌داری (p≤0.05) براساس آزمون LSD ندارند.

For each parameter, values followed by the same letter are not significantly different (p≤0.05) according to the LSD test.

بحث

عنب، شوری خاک به‌تنهایی ۷۴ تا ۸۲ درصد از تغییرات جمعیت باکتریایی، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی را تبیین می‌کند (جدول ۶). این حساسیت بسیار بالا احتمالاً ناشی از محتوای ماده آلی پایین‌تر و تحمل کمتر میکروارگانیسم‌های ریزوسفر عنب به تنش اسمزی است. در ریزوسفر پسته این رابطه ضعیف‌تر بود که با تحمل بالاتر این گونه به شوری سازگار است. تغییرات مشاهده شده در EC در خاک‌ها (۴۰ درصد خاک‌ها دارای مقدار EC بین ۴-۶ دسی‌زیمنس بر متر و ۳۰ درصد در محدوده ۶-۸ دسی‌زیمنس بر متر)، نشان دهنده تفاوت‌های شوری موضعی در باغ‌های پسته است که می‌تواند بر در دسترس بودن عناصر غذایی خاک و عملکرد درخت تأثیر بگذارد. بر اساس نتایج مطالعات، شوری خاک (EC)، میزان رس و غلظت بور خاک تأثیر منفی و معنی‌داری بر عملکرد، ویژگی‌های مورفولوژیکی و عناصر غذایی برگ‌های پسته داشته است (Ghasemzadeh Ganjehie et al., 2018). از طرفی، ریزوسفر عنب به طور متوسط EC برابر با ۸/۲۴

توسعه باغ‌ها و کاشت درختان پسته و عنب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل تحمل نسبتاً بالای آنها به شرایط نامساعد محیطی مانند تنش آبی، گرما و شوری افزایش یافته است. با وجود مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر در مورد مدیریت تغذیه، آبیاری و سایر ویژگی‌های این درختان، دانش کمی در مورد ویژگی‌های خاک این درختان وجود دارد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات خصوصیات شیمیایی خاک در ریزوسفر درختان پسته و عنب معنی‌دار شد. مقدار EC در ریزوسفر درختان پسته از ۴/۲۸ تا ۹/۵۴ دسی‌زیمنس بر متر متغیر و میانگین آن ۶/۶۹ دسی‌زیمنس بر متر بود. این نشان می‌دهد که درختان پسته معمولاً در خاک‌هایی با سطوح شوری متوسط تا زیاد رشد می‌کنند که با تحمل قابل انتظار این درخت به شرایط شوری سازگار است (Azarmi-Atajan et al., 2023). نتایج نشان داد که در ریزوسفر

دسی‌زیمنس بر متر را نشان داد که ۲۳ درصد بیشتر از خاک‌های پسته بود. درختان عناب عموماً نسبت به پسته تحمل بیشتری به شوری دارند، که این امر در سطوح بالاتر شوری در ریزوسفر عناب مشهود است. این واقعیت که ۷۰ درصد از خاک‌های عناب دارای EC بین ۷ تا ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر بودند، سازگاری این گونه را با محیط‌های با شوری نسبتاً بالا نشان می‌دهد، که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک که عناب در آنها کشت می‌شود، معمول است. اگرچه پسته (Brar et al., 2022) و عناب (Liu et al., 2019) به دلیل تحمل به شوری شناخته شده‌اند، اما رشد و عملکرد آنها همچنان می‌تواند تحت شرایط شوری بالای خاک به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گیرد. در مقایسه، pH در ریزوسفر عناب از ۷/۵۰ تا ۸/۲۰ متغیر بود، با میانگین ۷/۸۲، که ۰/۰۵ واحد کمتر از میانگین pH در خاک‌های پسته بود. اگرچه تفاوت pH بین این دو گونه ناچیز است، اما همچنان نشان می‌دهد که ریزوسفر درختان عناب ممکن است شرایط کمی اسیدی‌تر را ترجیح دهد. این تفاوت در pH ممکن است بر در دسترس بودن عناصر غذایی، به ویژه برای ریزمغذی‌هایی مانند آهن، روی و منگنز که در خاک‌های کمی اسیدی تا خنثی بیشتر در دسترس هستند، تأثیر بگذارد (Barrow and Hartemink, 2023). این مقادیر نشان می‌دهد که درختان پسته عموماً در خاک‌های کمی قلیایی رشد می‌کنند.

ریزوسفر پسته و عناب هر دو مقدار کربن آلی (OC) و ماده آلی (OM) پایینی را نشان دادند که این ویژگی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که در آنها ورودی‌ها و میزان تجزیه مواد آلی محدود است. در ریزوسفر پسته، مقدار کربن آلی از ۰/۱۱ درصد تا ۰/۵۱ درصد متغیر بود. اکثر خاک‌ها (۹۰ درصد) کربن آلی کمتر از ۰/۵ درصد داشتند. این مقادیر نشان‌دهنده سطح نسبتاً پایین مواد آلی در ریزوسفر است که می‌تواند فعالیت

میکروبی، چرخه عناصر غذایی و ساختمان خاک را محدود کند. به طور مشابه، در ریزوسفر عناب، مقدار کربن آلی از ۰/۱۵ درصد تا ۰/۳۹ درصد متغیر بود. همچنین، مقدار ماده آلی در خاک‌های عناب از ۰/۲۶ درصد تا ۰/۶۷ درصد متغیر بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مقدار ماده آلی در خاک‌های عناب نیز به طور مشابه پایین است که نشان‌دهنده شرایط خشک و ورودی‌های محدود مواد آلی در این محیط‌ها است. سطوح پایین کربن آلی و ماده آلی در هر دو ریزوسفر، نگرانی‌هایی را برای حاصلخیزی خاک و رشد گیاه در درازمدت ایجاد می‌کند. ماده آلی برای بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب و حفظ مواد مغذی ضروری است و سطوح پایین آن ممکن است رشد گیاه و فعالیت میکروبی خاک را محدود کند (Lal, 2020). برای بهبود سلامت و عملکرد خاک، ممکن است استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی یا اتخاذ شیوه‌هایی مانند کمپوست برای افزایش محتوای ماده آلی و افزایش حاصلخیزی خاک مفید باشد. ماده آلی همچنین می‌تواند حاصلخیزی خاک و در دسترس بودن عناصر غذایی را بهبود بخشد و سیستم‌های ریشه‌ای عمیق‌تر و گسترده‌تری ایجاد کند تا به طور مؤثر حجم بیشتری از خاک را برای آب و مواد مغذی جستجو کند (Tariq et al., 2024).

پتاسیم موجود در ریزوسفر پسته از ۲۱۵ تا ۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، با میانگین ۲۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، متغیر بود. در ریزوسفر عناب، پتاسیم موجود از ۱۷۹ تا ۲۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، با میانگین ۲۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، متغیر بود که کمتر از ریزوسفر پسته بود. این نشان می‌دهد که درختان عناب ممکن است در خاک‌هایی با پتاسیم کمتر رشد کنند که می‌تواند رشد و تولید میوه آنها را، به ویژه در خاک‌های دارای کمبود پتاسیم، محدود کند. کمترین غلظت پتاسیم مشاهده شده در خاک‌های عناب می‌تواند نتیجه عوامل خاص خاک مانند کاهش مواد مغذی یا شیوه‌های کوددهی ضعیف باشد. پتاسیم برای

بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی در گیاهان، از جمله فتوسنتز، تنظیم آب و تحمل به تنش، ضروری است و کمبود آن می‌تواند بر سلامت و بهره‌وری درخت تأثیر بگذارد (Zhang et al., 2024). با این حال، تغییرات مشاهده شده در غلظت پتاسیم در خاک‌های مختلف، با تفاوت‌های قابل توجه بین بالاترین (۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پایین‌ترین (۲۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، نشان می‌دهد که میزان پتاسیم قابل دسترس یکنواخت نیست و ممکن است نیاز به پایش و مدیریت داشته باشد. اگرچه مقدار پتاسیم قابل دسترس در خاک ریزوسفر درختان، به ویژه پسته، تقریباً در محدوده بهینه است، اما به دلیل شوری خاک‌ها و نقش این عنصر در کنترل جذب سدیم توسط گیاهان، به نظر می‌رسد که افزایش مقدار پتاسیم قابل دسترس در خاک همچنان برای عملکرد بهینه این درختان ضروری است. در میان عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان، اثر تحریک‌کننده پتاسیم بر فیزیولوژی، رشد، نمو و عملکرد گیاهان مختلف در شرایط شور به طور کامل اثبات شده است (Abbas et al., 2022).

نتایج نشان‌دهنده تنوع قابل توجهی در جمعیت باکتری‌ها (BP) در خاک‌های ریزوسفری مختلف درختان پسته و غناب بود. جمعیت باکتری‌ها در ریزوسفر درختان پسته از 1.05×10^5 تا 6.2×10^5 CFU/g soil متغیر بود. جمعیت باکتری‌ها در خاک‌هایی با محتوای مواد آلی بیشتر، بالاتر بود. این مشاهده با این شناخت که ماده آلی به عنوان منبع مواد مغذی و انرژی برای میکروب‌های خاک عمل می‌کند و در نتیجه جامعه میکروبی متنوع‌تر و فراوانی را پرورش می‌دهد، سازگار است (Biswas and Kole, 2017). در مقابل، کمترین BP در خاک شماره ۲ مشاهده شد که محتوای ماده آلی کمتری نیز داشت. این امر ارتباط ایجاد شده بین ماده آلی و فراوانی میکروبی را تقویت می‌کند، زیرا ماده آلی یک بستر حیاتی برای فعالیت و رشد میکروبی است. نتایج نشان می‌دهد که ماده آلی نقش

مهمی در شکل‌دهی جوامع میکروبی در ریزوسفر دارد، به طوری که خاک‌های غنی از مواد آلی، جمعیت بیشتری از باکتری‌ها را پشتیبانی می‌کنند (Ren et al., 2018). علاوه بر این، تفاوت قابل توجه در BP بین خاک‌هایی با سطوح مختلف ماده آلی، بر اهمیت کربن آلی خاک به عنوان عامل تعیین‌کننده زیست‌توده و فعالیت میکروبی تأکید می‌کند. نشان داده شده است که شوری بالا تأثیر منفی بر جمعیت میکروبی و تنفس میکروبی خاک دارد، که احتمالاً به دلیل تنش اسمزی است که رشد میکروبی را مهار می‌کند.

تنفس پایه (BR) و تنفس برانگیخته (SIR) شاخص‌های کلیدی فعالیت میکروبی خاک هستند، زیرا فرآیندهای متابولیکی ریزجانداران خاک را منعکس می‌کنند. تنفس پایه، CO_2 آزاد شده توسط زیست توده میکروبی خاک را در یک خاک اصلاح نشده اندازه‌گیری می‌کند. این پارامتر به عنوان شاخصی از فعالیت کلی میکروبی عمل می‌کند و مقدار آن تحت تأثیر عواملی مانند در دسترس بودن سوستر، وضعیت فیزیولوژیکی میکروب‌ها و نیازهای متابولیکی آنها قرار دارد (Romero-Freire et al., 2016). محدوده مشاهده شده مقادیر BR (۰/۱۴ تا ۰/۶۷ میلی‌گرم CO_2 در گرم خاک روز) و SIR (۰/۳۳ تا ۱/۱۸ میلی‌گرم CO_2 در گرم خاک روز) در ریزوسفر پسته با این واقعیت کلی که فعالیت میکروبی در خاک‌هایی با محتوای ماده آلی بالاتر افزایش می‌یابد، همسو است. خاک‌های شماره ۵ و ۹ بالاترین مقادیر BR و SIR را داشتند که با جمعیت باکتریایی بالاتر و محتوای ماده آلی بالاتر در این خاک‌ها سازگار بود. با تجزیه‌ی ماده‌ی آلی، بسترهایی برای ریزجانداران فراهم می‌شود که منجر به افزایش تنفس میکروبی می‌شود (Ren et al., 2018). بنابراین، نرخ بالاتر BR در خاک‌هایی با محتوای OM بیشتر در این مطالعه را می‌توان به عنوان نشانه‌ای از فعالیت و گردش میکروبی بالاتر تفسیر کرد که منجر به تجزیه بیشتر مواد آلی

می‌کند، که می‌تواند عامل مهمی در مناطقی باشد که خاک‌های شور شایع هستند. تنش‌های محیطی مانند شوری-قلیایی بودن خاک می‌توانند بر تعاملات خاک-ریشه-ریزجانداز تأثیر بگذارند. (Qu et al., 2022).

نتیجه‌گیری

مقایسه بین خاک‌های ریزوسفری درختان پسته و عناب، اطلاعات جالبی را در مورد تأثیر نوع درخت بر خواص میکروبی خاک نشان می‌دهد. جمعیت باکتریایی در ریزوسفر درختان پسته به طور کلی بیشتر از ریزوسفر عناب بود. این تفاوت را می‌توان به محتوای ماده آلی خاک نسبت داد، زیرا ریزوسفر درختان پسته معمولاً مواد آلی بیشتری دارند و مواد مغذی بیشتری را برای جوامع میکروبی فراهم می‌کنند. برعکس، ریزوسفر درختان عناب جمعیت باکتریایی کمتری را نشان دادند، که احتمالاً به دلیل عواملی مانند محتوای ماده آلی کمتر و شوری بالاتر است که می‌تواند مانع فعالیت میکروبی شود. علاوه بر تفاوت در جمعیت باکتریایی، میزان تنفس میکروبی (BR و SIR) نیز در ریزوسفر درختان عناب کمتر بود. این با تصویری که ماده آلی کمتر و شوری بالا در خاک‌های عناب، فرآیندهای متابولیک میکروبی را محدود می‌کند و منجر به کاهش تنفس و فعالیت میکروبی می‌شود، سازگار است. یکی از یافته‌های مهم در این مطالعه، رابطه معکوس بین فعالیت میکروبی (اندازه‌گیری شده توسط BP، BR و MBC) و شوری خاک، به ویژه در ریزوسفر عناب بود. در مورد عناب، خاک‌هایی با شوری بالاتر، جمعیت باکتریایی، میزان تنفس و زیست‌توده میکروبی کمتری را نشان دادند که اهمیت مدیریت سطوح شوری را برای حفظ سلامت و حاصلخیزی میکروبی خاک برجسته می‌کند. در نتیجه، این مطالعه نقش مهم ماده آلی در تنظیم جمعیت و فعالیت میکروبی خاک در ریزوسفر درختان پسته و عناب را برجسته می‌کند. همبستگی مثبت بین محتوای ماده

می‌شود. با این حال، در حالی که ماده آلی با BR و SIR همبستگی مثبت داشت، محتوای این شاخص‌ها در خاک‌های مورد مطالعه نسبتاً پایین بود، که می‌تواند نشان‌دهنده فعالیت میکروبی کلی پایین معمول در مناطق خشک یا نیمه‌خشک باشد که درختان پسته معمولاً در آنها کشت می‌شوند (Wang et al., 2022). این روند با این واقعیت که ۵۰ درصد از خاک‌ها مقدار BR کمتر از ۰/۱۵ میلی‌گرم CO₂ در گرم خاک داشتند، بیشتر مورد تأکید قرار گرفت. رن و همکاران گزارش داد که رابطه مستقیمی بین محتوای کربن خاک و تنفس میکروبی مشاهده شده است. همچنین، فراوانی و تنوع میکروب‌ها با کربن آلی و تنفس همبستگی مثبت داشت (Ren et al., 2018).

کربن زیست توده میکروبی به عنوان معیاری از زیست توده میکروبی در خاک عمل می‌کند که می‌تواند به عنوان شاخصی برای حاصلخیزی خاک و سلامت میکروبی مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر MBC مشاهده شده (۰/۱۵ تا ۱/۳۵ میلی‌گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک) در ریزوسفر پسته، این مفهوم را که ماده آلی عامل کلیدی تعیین کننده زیست توده میکروبی است، بیشتر تأیید می‌کند. روند مشابهی در ریزوسفر عناب مشاهده شد، جایی که MBC از ۰/۲۶ تا ۰/۸۷ میلی‌گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک متغیر بود و MBC بالاتر با خاک‌هایی که جمعیت باکتریایی و محتوای ماده آلی بالاتری دارند، مرتبط بود. این رابطه بین MBC و جمعیت باکتریایی با مطالعات قبلی که همبستگی مثبتی بین زیست توده میکروبی و اندازه جامعه میکروبی نشان داده‌اند، همسو است (Angst et al., 2021). لازم به ذکر است که MBC با شوری خاک در هر دو ریزوسفر رابطه معکوس داشت. شوری بالا اغلب اثر بازدارندگی بر رشد میکروبی دارد و زیست توده و فعالیت میکروبی را کاهش می‌دهد (Dong et al., 2022). رابطه معکوس مشاهده شده بین MBC و شوری، حساسیت جوامع میکروبی به تنش شوری را برجسته

Azarmi-Atajan, F., Sayyari-Zohan, M. H., & Mirzaei, F. (2023). Evaluation of the growth and status of some nutrients in pistachio seedlings treated with phosphorus under different levels of irrigation water salinity. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 6(3), 261-270. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2023.6271.1314>.

Barrow, N. J., & Hartemink, A. E. (2023). The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, 487, 21-37. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>

Biswas, T., & Kole, S. C. (2017). Soil organic matter and microbial role in plant productivity and soil fertility. In T. Adhya, B. Mishra, K. Annapurna, D. Verma, & U. Kumar (Eds.), *Advances in soil microbiology: Recent trends and prospects* (Vol. 4, Microorganisms for Sustainability). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7380-9_10.

Brar, G., Singh, S., Khezri, M., & Hadavi, F. (2022). Growth responses of pistachio rootstocks to irrigation water salinity. *Acta Horticulturae*, 1346, 767-774. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1346.98>.

Bünemann, K. L., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality- A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

De Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>.

Dong, Y., Zhang, J., Chen, R., Zhong, L., Lin, X., & Feng, Y. (2022). Microbial community composition and activity in saline soils of coastal agro-ecosystems. *Microorganisms*, 10(4), 835. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040835>.

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6).

Ghasemzadeh Ganjehie, M., Karimi, A., Zeinadini, A., & Khorassani, R. (2018). Relationship of soil properties with yield and morphological parameters of pistachio in geomorphic surfaces of Bajestan Playa, Northeastern Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20, 417-432. [Dor: 20.1001.1.16807073.2018.20.2.14.8](https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.014)

Jenkinson, D. S., & Ladd, J. N. (1981). Microbial biomass in soil: Measurement and turnover. In E. A. Paul & J. N. Ladd (Eds.), *Soil biochemistry* (pp. 415–471). Marcel Dekker, Inc.

Kumar, A., & Verma, J. P. (2019). The role of microbes in improving crop productivity and soil

آلی و فعالیت میکروبی، اهمیت شیوه‌های مدیریت خاک را که ورودی‌های مواد آلی را افزایش می‌دهند، مانند کمپوست یا تناوب زراعی، برای بهبود سلامت و حاصلخیزی میکروبی برجسته می‌کند. علاوه بر این، تأثیر مشاهده شده شوری خاک بر فعالیت میکروبی نشان می‌دهد که مدیریت شوری برای حفظ سلامت بیولوژیکی خاک در مناطقی که شرایط شور غالب است، بسیار مهم است. در ریزوسفر درختان عنب نسبت به پسته افزایش شوری به شدت جمعیت و فعالیت میکروبی را کاهش داد. بنابراین، مدیریت شوری (شستشوی نمک، استفاده از گوگرد، افزودن کمپوست یا کود دامی) و افزایش ماده آلی خاک اولویت اصلی مدیریت تغذیه و پایداری باغات عنب در مناطق شور دشت بیرجند است. بدیهی است که انجام مطالعات بیشتر و اندازه‌گیری شاخص‌های مختلف خاک می‌تواند به مدیریت خاک برای عملکرد بهینه درختان پسته و عنب کمک کند.

منابع

Abbas, G., Rehman, S., Siddiqui, M. H., Ali, H. M., Farooq, M. A., & Chen, Y. (2022). Potassium and humic acid synergistically increase salt tolerance and nutrient uptake in contrasting wheat genotypes through ionic homeostasis and activation of antioxidant enzymes. *Plants*, 11 (263). <https://doi.org/10.3390/plants11030263>.

Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (p. 608). Academic Press.

Anderson, J. P. E., Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). Soil respiration. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2* (2nd ed., pp. 831–871). ASA and SSSA.

Angst, G., Mueller, K. E., Nierop, K. G. J., & Simpson, M. J. (2021). Plant- or microbial-derived? A review of the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108-189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>

Azarmi, F., Mozafari, V., Abbaszadeh Dahaji, P., & Hamidpour, M. (2015). Isolation and evaluation of plant growth-promoting indices of *Pseudomonas fluorescens* isolated from pistachio rhizosphere. *Journal of Soil Biology*, 2(2), 173-186. <https://doi.org/10.22092/SBJ.2015.100867>. (In Persian)

- Differential soil microbial community responses to the linkage of soil organic carbon fractions with respiration across land-use changes. *Forest Ecology and Management*, 409, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.011>.
- Romero-Freire, A., Aragón, M. S., Garzón, F. M., & Peinado, F. M. (2016). Is soil basal respiration a good indicator of soil pollution? *Geoderma*, 263, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.006>.
- Semenov, M. V., Zhelezova, A. D., Ksenofontova, N. A., Ivanova, E. A., Nikitin, D. A., & Semenov, V. M. (2025). Microbiological indicators for assessing the effects of agricultural practices on soil health: A review. *Agronomy*, 15(2), 335. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020335>.
- Solomon, W., Janda, T., & Molnár, Z. (2024). Unveiling the significance of rhizosphere: Implications for plant growth, stress response, and sustainable agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 206, 108290. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108290>.
- Sparks, D. L. (1996). Methods of soil analysis. Part 3, chemical methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Tariq, A., Graciano, C., Sardans, J., Zeng, F., Hughes, A. C., Ahmed, Z., Ullah, A., Ali, S., Gao, Y., & Peñuelas, J. (2024). Plant root mechanisms and their effects on carbon and nutrient accumulation in desert ecosystems under changes in land use and climate. *New Phytologist*, 242(3), 916-934. <https://doi.org/10.1111/nph.19676>.
- Walkey, A., & Black, T. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Journal of Soil Science*, 37, 29-38.
- Wang, H., Wang, Y., Kang, C., Wang, S., Zhang, Y., Yang, G., et al. (2022). Drought stress modifies the community structure of root-associated microbes that improve *Atractylodes lancea* growth and medicinal compound accumulation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1032480. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1032480>.
- Xing, Y., Wang, X., & Mustafa, A. (2025). Exploring the link between soil health and crop productivity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 117703. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117703>.
- Yuan, Y., Dai, X., Fu, X., Kou, L., Luo, Y., Jiang, L., & Wang, H. (2020). Differences in the rhizosphere effects among trees, shrubs, and herbs in three subtropical plantations and their seasonal variations. *European Journal of Soil Biology*, 100, 103218. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103218>.
- Zhang, L., Jiang, Q., Zong, J., Guo, H., Liu, J., & Chen, J. (2024). Effects of Supplemental Potassium on the Growth, Photosynthetic Characteristics, and health. In V. Achal & A. Mukherjee (Eds.), *Ecological wisdom inspired restoration engineering (EcoWISE)*, pp. 1-14. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0149-0_14.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>.
- Lecomte, S. M., Achouak, W., Abrouk, D., Heulin, T., Nesme, X., & Haichar, F. Z. (2018). Diversifying anaerobic respiration strategies to compete in the rhizosphere. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 139. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00139>.
- Liu, Z., Jiao, X., Lu, S., Zhu, C., Zhai, Y., & Guo, W. (2019). Effects of winter irrigation on soil salinity and jujube growth in arid regions. *PLOS ONE*, 14(6), e0218622. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218622>.
- Ma, F., Wang, C., Zhang, Y., Chen, J., Xie, R., & Sun, Z. (2022). Development of microbial indicators in ecological systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 13888. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113888>.
- Mitra, D., Nayeri, F. D., Sansinenea, E., Ortiz, A., Bhatta, B. B., Adeyemi, N. O., ... Panneerselvam, P. (2023). Unraveling arbuscular mycorrhizal fungi interaction in rice for plant growth development and enhancing phosphorus use efficiency through recent development of regulatory genes. *Journal of Plant Nutrition*, 46(13), 3184-3220. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2191638>.
- Niu, B., Wang, W., Yuan, Zh., Sederoff, R. R., Sederoff, H., Chiang, V., & Borris, R. (2020). Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease. *Frontiers Microbiology*, 11, 585404. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.585404>.
- Philippot, L., Chenu, C., Kappler, A., Rillig, M., & Fierer, N. (2024). The interplay between microbial communities and soil properties. *Nature Reviews Microbiology*, 22, 226-239. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00980-5>.
- Qu, Y., Tang, J., Liu, B., Lyu, H., Duan, Y., Yang, Y., Wang, S., Li, Z. H. (2022). Rhizosphere enzyme activities and microorganisms drive the transformation of organic and inorganic carbon in saline-alkali soil regions. *Scientific Reports*, 12, 1314. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05218-7>.
- Raza, T., Qadir, M. F., Khan, K. S., Eash, N. S., Yousuf, M., Chatterjee, S., Manzoor, R., Rehman, S. U., Oetting, J. N. (2023). Unraveling the potential of microbes in the decomposition of organic matter and the release of carbon in the ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 344, 118529. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118529>.
- Ren, Ch., Wang, T., Xu, Y., Deng, J., Zhao, F., Yang, G., Han, X., Feng, Y., Ren, G. (2018).

Ion Content of *Zoysia matrella* under Salt Stress. *Horticulturae*, 10(1), 31.
doi.org/10.3390/horticulturae10010031.

