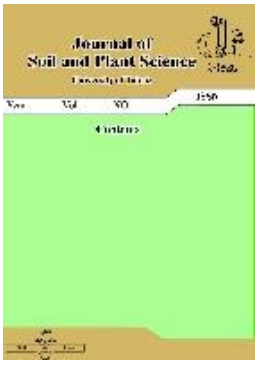
J Soil Plant Sci, 2026, 36(1): 19-41.

https://doi.org/10.22034/sps.2026.70938.1029

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106
https://sps.tabrizu.ac.ir



Research Article

Effect of Triple Superphosphate Integration with Leonardite on Some Chemical Characteristics and Microbial Population of an Alkaline Sandy Loam Soil and Concentrations of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Leaves of *Nigella sativa*

Mehsa Abedi[1], Jalil Shafagh-Kolvangh [2]✉, Arash Hemati[3]

1- Department of Plant Ecophysiology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mahsaabedi@tabrizu.ac.ir

2- Corresponding Author, Department of Plant Ecophysiology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: shafagh.jalil@gmail.com

3- Department of Soil and Water Research, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of East Azerbaijan Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran. E-mail: ar_hemati@areeo.ac.ir

Received: December 27, 2025	**Revised:** January 27, 2026
Accepted: January 28, 2026	**Published:** January 30, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Improvement of soil productivity and nutrient use efficiency in medicinal plants, especially in light-textured soils, requires integrated nutrient management strategies. Light soils, such as sandy loam, often have low nutrient retention capacity, high nitrogen and potassium leaching potential, and limited microbial activity, leading to reduced soil fertility and plant nutrient uptake. Humic substances, such as leonardite, are recognized for their ability to improve soil chemical and biological properties, enhance microbial activity, and stabilize nutrients. Phosphate fertilizers, particularly triple superphosphate, provide essential phosphorus for plant growth, but their efficiency is often limited by soil fixation and low mobility in light soils. This study aimed to evaluate the effects of leonardite (rich in humic acids) and triple superphosphate on soil chemical and biological properties (total N, available- P and K, organic matter, electrical conductivity, and microbial populations) and nutrient uptake in *Nigella sativa* L. grown in a sandy-loam soil under rainfed conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted in the Parchin region, Germi County, Ardabil province, Iran (39°08'47" N, 48°23'60" E). The field trial was established in a randomized complete blocks design with 9 treatments and 3 replications. Treatments included: 1- Control (no fertilizer), 2- Triple superphosphate 50 kg ha^{-1} (P50), 3- Triple superphosphate 100 kg ha^{-1} (P100), 4- Leonardite 100 kg ha^{-1} (H100), 5- Leonardite 200 kg ha^{-1} (H200), 6- P50 + H100, 7- P25 + H150, 8- P75 + H50, and 9- P25 + H50. Each experimental plot consisted of 2 m×2 m, with 25 cm row spacing, 10 cm plant spacing, and a density of 40 plants per m^2. The soil preparation was done with a chisel plow, and all fertilizers were applied at planting. The trial was conducted under rainfed conditions without irrigation. The soil samples were collected from 0–30 cm depth after harvest. The soil organic carbon was determined using the Walkley–Black method. Total nitrogen of soil and plant samples was measured by the Kjeldahl method. Available phosphorus was extracted by the Olsen method, and available potassium by ammonium acetate. Leaf samples were dried and analyzed for total nitrogen (Kjeldahl), phosphorus (molybdenum–vanadate colorimetry), and potassium (flame photometry). Microbial populations in the rhizosphere and non-rhizosphere soils were counted using standard plating techniques. Data were analyzed using SPSS software, means comparison was performed by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$, and correlation coefficients among traits were also determined.

Results

The results of this study indicated that the combined application of leonardite and triple superphosphate significantly influenced the soil chemical and biological properties as well as nutrient uptake in *Nigella sativa*. The highest increase in soil organic matter was observed in the P25H150 (14.1 g/kg) and H200 (13.7 g/kg) treatments, representing 7% and 5% increases compared to the control (13.1 g/kg), respectively. The soil total nitrogen concentration was highest in P25H150 (0.83 g/kg), a 57% increase over the control (0.53 g/kg) and its value in H200 treatment was 0.77 g/kg (45% increase relative to the control). The soil available phosphorus reached its maximum (7 mg/kg) in P50H100 treatment, representing a 63% increase relative to the control (4.3 mg/kg). The effects of treatments were not significant on soil available potassium and electrical conductivity (EC). Rhizosphere and non-rhizosphere microbial populations were highest in P25H150 treatment and lowest in the control. Increases in microbial populations were positively and significantly correlated with soil organic matter and leaf nitrogen concentration. Leaf nitrogen concentration was highest (27.8 mg/g) in P25H150 treatment. Leaf phosphorus concentration (3.77 mg/g) and leaf potassium concentration (25.7 mg/g) peaked in P50H100. Correlation analysis revealed positive and significant relationships between soil organic matter and total soil nitrogen ($r = 0.59^{**}$) as well as rhizosphere microbial population ($r = 0.62^{**}$). Leaf nitrogen concentration was positively correlated with soil nitrogen ($r = 0.50^{**}$), leaf phosphorus ($r = 0.68^{**}$), and leaf potassium ($r = 0.53^{**}$). Leaf potassium concentration and soil available phosphorus positively correlated with microbial populations in rhizosphere and non-rhizosphere. Also, leaf phosphorus concentration showed a strong positive correlation with soil available phosphorus ($r = 0.75^{**}$).

Conclusions

Overall, integrated application of leonardite and triple superphosphate, particularly at 25 kg P + 150 kg leonardite/ha, significantly improved soil chemical and biological properties and enhanced macronutrient uptake in *Nigella sativa* plant in a sandy-loam soil under rainfed conditions. Also, leonardite alone at 200 kg/ha positively influenced soil fertility and leaf macronutrient concentrations. Enhanced nitrogen, phosphorus, and potassium concentrations in leaves, together with improved soil organic matter and microbial populations, demonstrated the effectiveness of the combined organic–mineral strategies in promoting nutrient stability and bioavailability. These findings highlight that optimized applications of leonardite and triple superphosphate can serve as an efficient approach for sustainable soil fertility management and improving productivity of medicinal plants, especially in low-organic matter soils and semi-arid regions.

Keywords: Chemical fertilizer, Humic acid, Integrated soil fertility management, Medicinal plant, Plant nutrition, Organic fertilizer.

Author Contributions

Conceptualization and methodology, M.A. & J.S.K.; Performing experiments and measurements, M.A.; formal analysis and data curation, M.A. & J.S.K.; writing-original draft preparation, M.A., writing- review and editing, M.A. & J.S.K.; supervision, J.S.K.; project administration, J.S.K.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a Ph.D. thesis supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Tabriz, Tabriz, Iran. The authors are thankful to the University of Tabriz for financial supports.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

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

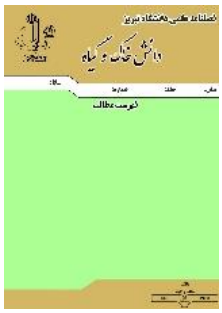
Cite this article: Abedi, M., Shafagh-Kolvangh, J., & Hemati, A. (2026). Effect of triple superphosphate integration with leonardite on some chemical characteristics and microbial population of an alkaline sandy loam soil and concentrations of nitrogen, phosphorus, and potassium in leaves of *Nigella sativa*. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(1), 19-41.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.70938.1029

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

Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS JOURNALS

نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۱
صفحه‌های ۱۹ تا ۴۱، بهار ۱۴۰۵
https://doi.org/10.22034/sps.2026.70938.1029
E-ISSN: 3092-6106
https://sps.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

اثر تلفیق تریپل سوپرفسفات با لئوناردیت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و جمعیت میکروبی یک خاک لوم شنی قلیایی و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ سیاهدانه

مهسا عابدی[۱]، جلیل شفق کلوانق[۲]✉، آرش همتی[۳]

۱- گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mahsaabedi@tabrizu.ac.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: shafagh@tabrizu.ac.ir
۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. رایانامه: ar_hemati@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

چکیده

افزایش حاصلخیزی خاک و کارایی جذب عناصر غذایی در گیاهان دارویی، به‌ویژه در خاک‌های با بافت سبک، نیازمند بهره‌گیری از مدیریت تلفیقی تغذیه گیاهان است. این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد لئوناردیت، منبع غنی از هیومیک اسید و تریپل سوپرفسفات بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک، جمعیت میکروبی و غلظت عناصر غذایی برگ سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) در یک خاک لوم شنی انجام شد. این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در منطقه پرچین شهرستان گرمی، استان اردبیل، در شرایط دیم با ۹ تیمار شامل ۱- شاهد، ۲- تریپل سوپرفسفات ۵۰ کیلوگرم بر هکتار، ۳-تریپل سوپرفسفات ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار، ٤- لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار، ٥- لئوناردیت ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار، ٦- ٥٠ کیلوگرم تریپل سوپرفسفات + ۱۰۰ کیلوگرم لئوناردیت بر هکتار، ۲۵-۷ کیلوگرم تریپل سوپرفسفات + ۱۵۰ کیلوگرم لئوناردیت بر هکتار، ۸- ۷۵ کیلوگرم تریپل سوپرفسفات + ۵۰ کیلوگرم لئوناردیت بر هکتار و ۹- ۲۵ کیلوگرم تریپل سوپرفسفات + ۵۰ کیلوگرم لئوناردیت بر هکتار انجام شد. تجزیه واریانس نشان داد که تیمارها بر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم کل برگ سیاهدانه، غلظت نیتروژن کل و فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک و جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر سیاهدانه و غیرریزوسفر تأثیری معنادار داشتند اما اثر آن‌ها بر EC، کربن آلی و غلظت پتاسیم قابل‌جذب گیاه در خاک معنادار نبود. بیشترین غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ سیاهدانه و بیشترین جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفر و غیرریزوسفر و بیشترین کربن آلی در تیمار تلفیقی ۲۵ کیلوگرم تریپل سوپرفسفات + ۱۵۰ کیلوگرم لئوناردیت بر هکتار مشاهده شد. این تیمار موجب افزایش معنادار غلظت نیتروژن کل و فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک نسبت به شاهد شد. همبستگی مثبت و معنادار بین غلظت فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک با غلظت این عنصر در برگ گیاه سیاهدانه ($r = 0.75^{**}$) بیانگر انتقال مؤثر فسفر به این گیاه بود. به‌طور کلی، تیمارهای تلفیقی آلی – معدنی با افزایش ماده آلی خاک و فعالیت میکروبی، سبب بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش غلظت عناصر غذایی پرمصرف اولیه در خاک و برگ سیاهادانه شدند. این رویکرد می‌تواند در مدیریت خاک‌های قلیایی با بافت سبک به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای تولید پایدار گیاهان دارویی از جمله سیاهدانه توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: تغذیه گیاه، کود آلی، کود شیمیایی، گیاه دارویی، مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک، هیومیک اسید.

استناد به این مقاله: عابدی، م.، شفق کلوانق، ج. و همتی، آ. (۱۴۰۵). اثر تلفیق تریپل سوپرفسفات با لئوناردیت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و جمعیت میکروبی یک خاک لوم شنی قلیایی و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ سیاهدانه. *نشریه دانش خاک و گیاه*، ۳۶(۱)، ۴۱-۱۹.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.70938.1029

مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از منابع پایه و غیرقابل تجدید در نظام‌های کشاورزی وبه‌ویژه در نظام‌های تولید محصولات سالم کشاورزی، نقش کلیدی در پایداری تولید ایفا می‌کند (Jahan *et al.*, 2013). خاک‌های سبک‌بافت با درصد شن بالا، به‌دلیل ظرفیت نگهداری کم آب و عناصر غذایی، ساختمان فیزیکی نامطلوب و فعالیت میکروبی محدود، با چالش‌هایی در فراهمی عناصر غذایی و کارایی مصرف کود مواجه هستند (Elsayed *et al.*, 2022). در چنین شرایطی، استفاده از مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه که ترکیب منابع آلی و معدنی را به‌کار می‌گیرد، می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در زیست‌فراهمی عناصر عذایی و پایداری زیستی–تغذیه‌ای حاصل نماید (Vanlauwe *et al.*, 2015).

فسفر یکی از عناصر ضروری برای رشد و تکامل گیاهان است که نیاز گیاه به آن در مرحله زایشی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. ازاین‌رو، مدیریت بهینه مصرف کود فسفر برای تأمین نیاز گیاه در مراحل حساس رشد، ضروری است (Lopes, 1996). این عنصر در ذخیره‌سازی و انتقال انرژیو در فرایندهای رشد و نمو گیاهان، نقشی کلیدی ایفا می‌کند (Hopkins & Ellsworth, 2003). ناکافی بودن جذب فسفر به‌وسیله ریشه گیاه، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاه به شمار می‌رود (Takahashi & Katoh, 2023). در اغلب خاک‌های ایران که دارای بافت آهکی و pH نامناسب هستند، کمبود فسفر پدیده‌ای شایع است؛ به‌طوری‌که بخش قابل‌توجهی از کود فسفر محلول در این خاک‌ها به شکل‌های نامحلول و غیرقابل‌جذب برای گیاه تبدیل می‌شود (Najafi & Towfighi, 2011; Marsac *et al.*, 2021). بر اساس گزارش‌ها، به‌دلیل تثبیت فسفر در خاک، تنها حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد از فسفر مصرفی به‌وسیله گیاه جذب شده و بقیه آن در خاک تجمع یافته و از دسترس گیاه خارج می‌گردد (Liu *et al.*, 2023).

لئوناردیت به‌عنوان یک منبع آلی پایدار و غنی از هیومیک اسید، اثرهای مثبتی بر بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تحریک رشد ریشه گیاه و ارتقای فعالیت میکروبی خاک دارد (Pikuła, 2024). هیومیک اسید مشتق‌شده از لئوناردیت، با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهم‌سازی بستر مناسب‌تر برای رشد ریزجانداران مفید، به‌طور غیرمستقیم می‌تواند فعالیت زیستی خاک را افزایش داده و آزادسازی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر را تسهیل نماید (Liu *et al.*, 2023). این ترکیب آلی، از طریق شکستن پیوندهای Ca–P در خاک‌های قلیایی و پیوندهای Al–P یا Fe–P در خاک‌های اسیدی، قادر است فسفر تثبیت‌شده را به شکل قابل‌جذب برای گیاه آزاد کند؛ فرایندی که می‌تواند منجر به افزایش کارایی کودهای فسفری و بهبود عملکرد گیاه در خاک‌های اصلاح‌شده با مواد آلی گردد (Marsac *et al.*, 2021). افزون بر این، ترکیب لئوناردیت با کودهای فسفری اثرهای هم‌افزایی قابل‌توجهی در بهبود زیست‌فراهمی فسفر و تحریک جمعیت میکروبی مفید خاک ایجاد کرده و در نتیجه پایداری تغذیه‌ای گیاه را افزایش می‌دهد (El-Sayed *et al.*, 2014; Kaya *et al.*, 2020).

سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) گیاهی دولپه‌ای، علفی و یک‌ساله از خانواده آلاله (*Ranunculaceae*) است که به‌صورت خودرو در نواحی مختلف جهان پراکنش دارد (Abou El-Leel *et al.*, 2019). علاوه‌بر پراکنش طبیعی، به‌دلیل کاربرد گسترده در صنایع داروسازی، این گیاه در بسیاری از مناطق جهان به‌صورت زراعی نیز کشت می‌شود (Abou El-Leel *et al.*, 2019). سیاهدانه به‌دلیل داشتن ترکیبات زیست‌فعال متنوع به‌ویژه تیموکینون، از اهمیت دارویی و اقتصادی قابل‌توجهی برخوردار بوده و تولید پایدار آن در خاک‌های سبک‌بافت، مستلزم مدیریت دقیق تغذیه گیاه و بهبود شرایط زیست‌پذیری خاک است (Ijaz *et al.*, 2017).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرهای کاربرد تلفیقی لئوناردیت و تریپل سوپرفسفات بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک و جذب عناصر غذایی به‌وسیله گیاه سیاهدانه در یک خاک لوم شنی انجام شد. در این مطالعه، غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ، تغییرات این عناصر در خاک، جمعیت میکروبی و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) اندازه‌گیری گردید تا نقش هم‌افزایی منابع آلی و معدنی در بهبود پایداری زیستی–تغذیه‌ای در نظام خاک–گیاه ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در منطقه پرچین (با مختصات جغرافیایی ۳۹ درجه و ۰۸ دقیقه و ٤٧ ثانیه عرض شمالی و ٤٨ درجه و ۲۳ دقیقه و ٦۰ ثانیه طول شرقی)، شهرستان گرمی و با همکاری دانشگاه تبریز انجام شد. ارتفاع محل اجرای آزمایش از سطح دریا حدود ۷۹۹ متر است. آب و هوای این منطقه مدیترانه‌ای، گرم و نیمه‌خشک با تابستانی گرم و مرطوب و زمستانی معتدل و ملایم می‌باشد. منطقه آزمایش تقریباً از نقاط پربارش استان اردبیل بوده و بر اساس داده‌های اقلیمی متوسط بارندگی سالانه این منطقه بالای ۵۰۰ میلی‌متر است که بیشترین حجم بارش در فصل زمستان و بهار رخ می‌دهد و با پیشرفت به سمت تابستان کاهش می‌یابد. در سال اجرای آزمایش نیز ۵۰۰ میلی‌متر بارندگی ثبت شد. در دوره مورد مطالعه (اواخر اسفند ۱٤۰۰ تا اواخر تیر ۱٤۰۱)، بارندگی‌ها در طول فصل رشد به صورت چند نوبت بارش متناوب در اواخر زمستان و بهار بود و با گرم‌تر شدن هوا در خرداد و تیر، شدت و فراوانی نوبت‌های بارش کاهش یافت. دمای محیط در طول دوره رشد محصول از حدود ۷ تا ۱۰ درجه سلسیوس در اوایل فصل رشد (اواخر زمستان–فروردین) به حدود ۲۵ تا ۲۹ درجه سلسیوس در اواسط تا اواخر تابستان افزایش یافت.

آزمایش مزرعه‌ای این تحقیق با ۹ تیمار و سه تکرار، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در اواسط اسفند ماه ۱٤۰۰ به مدت یک سال زراعی انجام شد. عوامل آزمایش شامل لئوناردیت (منبع غنی از هیومیک اسید) و کود تریپل سوپرفسفات از شرکت قیزیل توپراق سهند تهیه شد. تیمارهای آزمایشی شامل ۱–شاهد بدون کود (شاهد)، ۲–تریپل سوپرفسفات ۵۰ کیلوگرم بر هکتار (P50)، ۳– تریپل سوپرفسفات ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار (P100)، ٤–لئوناردیت (منبع غنی از هیومیک اسید) ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار (H100)، ۵– لئوناردیت ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار (H200)، ٦– تریپل سوپرفسفات ۵۰ کیلوگرم + لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار (P50H100)، ۷– تریپل سوپرفسفات ۲۵ کیلوگرم + لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار (P25H150)، ۸– تریپل سوپرفسفات ۷۵ کیلوگرم + لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم بر هکتار (P75H50) و ۹– تریپل سوپرفسفات ۲۵ کیلوگرم + لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم بر هکتار (P25H50) بودند.

برخی ویژگی‌های خاک لوم شنی مورد مطالعه که از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شده بود، در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Or, 2002)، کربن آلی خاک به روش والکلی – بلک (Page et al., 1982)، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر (Blake & Hartge, 1986)، رطوبت اشباع خاک با روش Gardner (1986)، pH و EC خاک در سوسپانسیون خاک–آب (۱:۵) (Page et al., 1982)، نیتروژن کل خاک به روش کجلدال، فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک به روش اولسن، پتاسیم قابل جذب گیاه در خاک به روش عصاره‌گیری با آمونیوم استات یک مولار (Page et al., 1982)، مس، منگنز، آهن و روی با عصاره‌گیر DTPA

(Lindsay & Norvell, 1987) تعیین شدند. غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر و آهن، روی، مس و منگنز با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردیدند (Page et al., 1982; Ryan et al., 2001).

ویژگی‌های لئونارديت استفاده شده در جدول ۲ آورده شده است. هر واحد آزمایشی به ابعاد ۲×۲ متر مربع در نظر گرفته شد و فاصله بین ردیف‌ها، ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی هر ردیف ۱۰ سانتی‌متر با تراکم ۴۰ بوته در متر مربع بود. آماده‌سازی بستر کشت با گاوآهن قلمی و به صورت شخم نیمه‌عمیق انجام شد و کلیه تیمارهای آزمایشی همراه با کاشت به خاک اضافه شدند. کلیه واحدهای آزمایشی به صورت دیم و بدون آبیاری بودند. بعد از اتمام کار و برداشت گیاهان نمونه‌هایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک تهیه و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شدند. ماده آلی خاک به روش والکلی و بلک و بر اساس اندازه‌گیری کربن آلی خاک تعیین شد. برای اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک، نمونه‌ها پس از خشک شدن و الک شدن، با استفاده از روش کجلدال تعیین شدند. در این روش، نمونه‌ها با اسید سولفوسالیسیلیک و کاتالیزور (مرکب از سلنیم، پتاسیم سولفات و مس سولفات) هضم گردیدند. سپس مقدار نیتروژن کل با استفاده از دستگاه کجلدال تقطیر و اندازه‌گیری شد (Ryan *et al.*, 2001).

برای بررسی جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفر و غیرریزوسفر، از روش رقت سریالی و شمارش کلونی استفاده شد (Ben-David & Davidson, 2014). نمونه‌برداری در مرحله گل‌دهی گیاه انجام شد. برای جداسازی خاک ریزوسفر، گیاهان با دقت از خاک خارج شده و خاک چسبیده به ریشه‌ها به‌عنوان نمونه ریزوسفر جمع‌آوری گردید. خاک غیرریزوسفر نیز از فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری از ریشه و از همان عمق برداشت شد. برای این کار، ۱۰ گرم خاک تازه در ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل سوسپانسیون شد و پس از همگن‌سازی، رقت‌های ده‌دهی (تا 10^{-3}) تهیه گردید. از هر رقت، ۰/۱ میلی‌لیتر بر روی محیط نوترینت آگار[1] به روش پخش سطحی کشت داده شد. پلیت‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۳۰ درجه سلسیوس انکوبه و کلونی‌های تشکیل‌شده شمارش شدند. جمعیت میکروبی به‌صورت واحد تشکیل کلونی در هر گرم خاک خشک ($CFU \cdot g^{-1}$ dry soil) محاسبه گردید.

شکل ۱- نمایی از مراحل مختلف رشد سیاهدانه در مزرعه.

نمونه‌های برگ پس از خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، آسیاب شدند و غلظت نیتروژن کل آن‌ها با استفاده از روش کجلدال تعیین شدند. برای تعیین غلظت فسفر و پتاسیم کل، برگ‌ها ابتدا خاکستر شده و سپس خاکستر در هیدروکلریک اسید دو نرمال حل شده و غلظت فسفر با روش رنگ‌سنجی مولیبدو–وانادات با دستگاه اسپکترفتومتر و غلظت پتاسیم با دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری گردید (Ryan et al., 2001). نتایج به دست آمده

[1]-Nutrient agar

تحلیل آماری داده‌ها، پس از انجام آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، به‌وسیله نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همبستگی صفات نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS بررسی شد. برای ترسیم شکل‌ها و نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه.

ماده آلی (٪)	رطوبت اشباع (٪)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	بافت خاک
1.3	25	1.58	15	18	67	لوم شنی

جدول ۱- ادامه

pH (1:5)	EC (dS/m)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)
7.2	0.23	0.05	4.4	155	3.2	0.6	0.5	4.3

غلظت نیتروژن خاک به صورت کل، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز صورت قابل‌جذب گزارش شده‌اند.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی لئوناردیت مورد استفاده.

	pH (1:5)	N (%)	P (%)	K (%)	Fe (%)	Zn (%)	Mn (mg/kg)	FA[۲] (%)	HA[۳] (%)	OM (%)
لئوناردیت	6.5	0.7	0.3	0.7	0.04	0.01	30	1	25	49

غلظت کلیه عناصر گزارش‌شده در جدول، شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و منگنز به صورت **کل** اندازه‌گیری و ارائه شده‌اند.

نتایج و بحث

در جدول ۳، نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت عناصر غذایی و در جدول ٤، نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر برخی ویژگی‌های خاک ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر عناصر غذایی.

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		نیتروژن کل برگ	فسفر کل برگ	پتاسیم کل برگ	نیتروژن کل خاک	فسفر فراهم خاک	پتاسیم فراهم خاک
تیمار	۸	۰/۰۲۷**	۰/۰۰٤**	۰/۱۰۳**	۰/۰۰۰**	۲/٤۲٦**	۹/۹۲٦ ns
تکرار	۲	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۲۹ ns	۰/۰۰۰۳۳۳۳ ns	۱/٥۹۳**	٥/٤۸۱ ns
خطا	۱٦	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰٥٤۱۷	۰/۲۱۸	۱۲/۹٤۰
ضریب تغییرات (٪)		۳/۱	٥/٤۹	۳/۷۹	۱۱/۰٤	۸/۰۲	۲/۳۲

**، تفاوت معنادار در سطح احتمال خطای یک درصد، ns، عدم‌تفاوت معنادار.

[2] Fulvic Acid
[3] Humic Acid

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر برخی ویژگی‌های خاک.

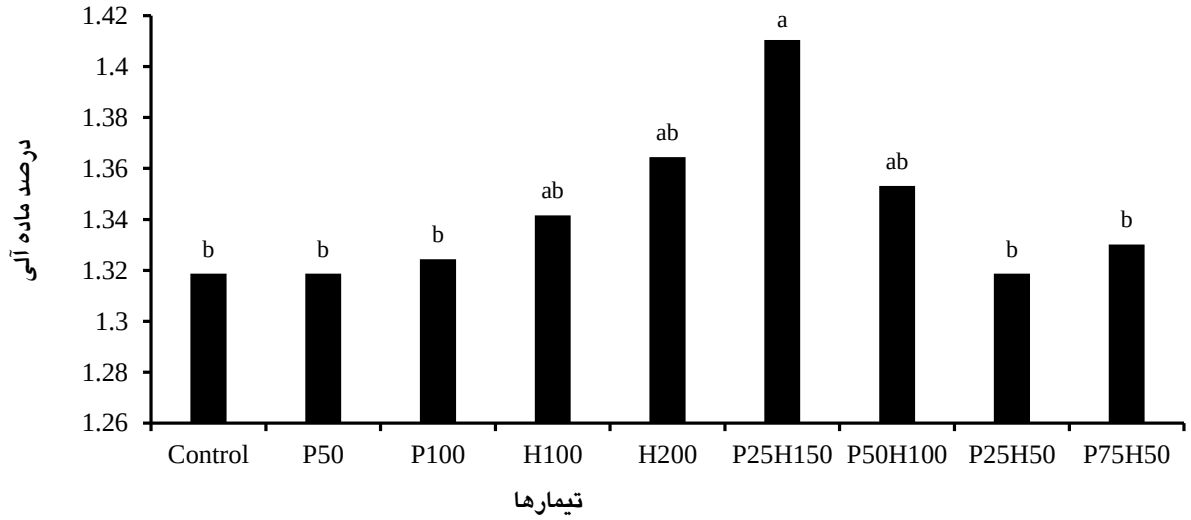
منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		EC خاک	جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر $\times ۱۰^{-۳}$	جمعیت میکروبی خاک غیرریزوسفر $\times ۱۰^{-۳}$	ماده آلی خاک
تیمار	۸	۰/۰۰۰۰۰۴۸ ns	۷۶۹/۹۱۷**	۲۴۰/۵۳۷**	۰/۰۰۳ ns
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۰۳۲ ns	۰/۴۴۴ ns	۵/۵۹۳ ns	۰/۰۰۲ns
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۱۹۶	۳۴/۷۷۸	۱۵/۲۱۸	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (٪)		۰/۵۶	۸/۳۱	۶/۹۶	۳/۰۴

**، تفاوت معنادار در سطح احتمال خطای یک درصد، ns، عدم‌تفاوت معنادار.

مقدار ماده آلی خاک

نتایج این پژوهش نشان داد که تیمارهای مختلف لئوناردیت و تریپل سوپرفسفات از نظر آماری بر مقدار ماده آلی خاک تأثیر معناداری نداشتند (جدول ۴) اما روند افزایشی قابل‌توجهی در تیمارهای حاوی لئوناردیت مشاهده شد. مقدار ماده آلی در تیمارهای P25H150 و H200 به‌ترتیب ۱/۴۱ (۷ درصد افزایش) و ۱/۳۷ (۵ درصد افزایش) ثبت شد، در حالی‌که مقدار آن در تیمار شاهد ۱/۳۱ درصد بود (شکل ۱). حتی افزایش‌های محدود در مقدار ماده آلی خاک در طول یک فصل زراعی، می‌تواند تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر پارامترهای فیزیکی-شیمیایی و پایداری خاک داشته باشد. لئوناردیت به‌عنوان منبع غنی از اسیدهای هیومیک، ساختار کربنی پایدار و آروماتیک دارد و از جمله منابعی است که به‌تدریج می‌تواند پایداری کربن خاک را حفظ کرده و ظرفیت نگهداری عناصر غذایی را افزایش دهد (Tiwari *et al.*, 2023; Kandra *et al.*, 2024).

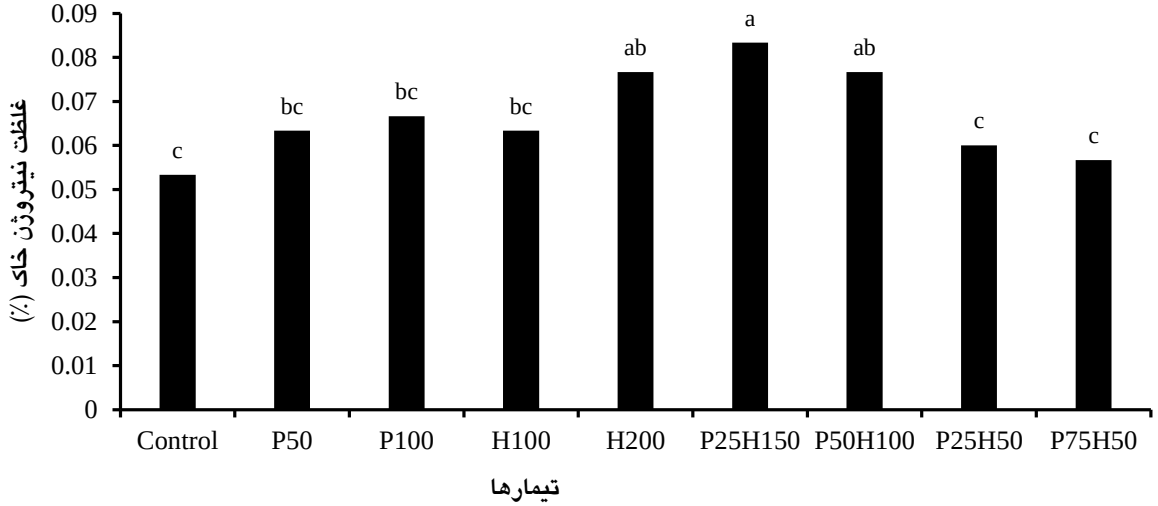
به نظر می‌رسد استفاده همزمان لئوناردیت به میزان ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار و فسفر به میزان ۲۵ کیلوگرم بر هکتار اثر هم‌افزایی داشته و موجب افزایش ماده آلی خاک با افزایش رشد ریشه و ترشحات آن (به عنوان منبع ماده آلی) شده است (Amadou *et al.*, 2021). همچنین، در تیمارهای P100 و P50 که تریپل سوپرفسفات استفاده شده بود، افزایش رشد ریشه گیاهان می‌تواند عامل افزایش ماده آلی و کربن آلی در این تیمارها باشد (Amadou *et al.*, 2021). همبستگی مثبت و معنادار ماده آلی خاک با برخی صفات کلیدی، از جمله نیتروژن کل خاک (r=0.59**) و جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر (r=0.62**) (جدول ۵)، بیانگر نقش عملکردی آن در بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک است. در مجموع، با وجود آن‌که ماده آلی خاک تحت تأثیر تیمارها تفاوت آماری معناداری نشان نداد، اما روند افزایشی آن، همراه با همبستگی‌های معنادار با صفات حاصلخیزی و میکروبی، نقش محوری آن را در بهبود عملکرد تغذیه‌ای و زیستی خاک اثبات می‌کند.



شکل ۲- تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار ماده آلی خاک پس از برداشت گیاهان سیاهدانه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

غلظت نیتروژن کل خاک

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارهای مورد استفاده بر نیتروژن خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین نیتروژن خاک در تیمار P25H150 با ۰/۰۸۳ درصد (۵۷ درصد افزایش) و کمترین مقدار در تیمار شاهد با ۰/۰۵۳ درصد بود. تیمارهای H200 و P50H100 هر دو با ۰/۰۷۷ درصد (٤٥ درصد افزایش)، تفاوت معناداری با تیمار P25H150 نداشتند و دارای بیشترین نیتروژن خاک زیر کشت سیاهدانه بودند (شکل ۲). در خاک‌های با بافت سبک، مانند خاک این پژوهش، توان نگهداری نیتروژن، به‌ویژه در شکل نیتراتی آن، بسیار کم است و خطر آبشویی نیترات وجود دارد. از این‌رو، افزایش معنادار نیتروژن کل در تیمارهای حاوی لئوناردیت می‌تواند به نقش هیومیک اسید در کاهش هدررفت نیتروژن و بهبود نگه‌داری آن در خاک نسبت داده شود (Liu *et al.*, 2010; Swify *et al.*, 2023).

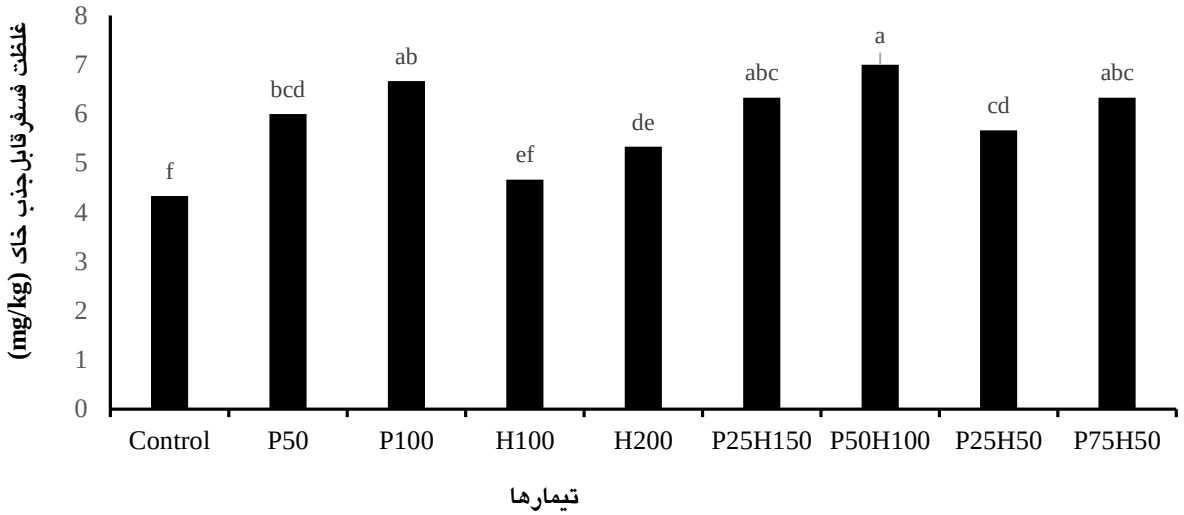


شکل ۳- تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت نیتروژن کل خاک پس از برداشت گیاهان سیاهدانه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

غلظت فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۳). بیشترین مقدار فسفر در تیمار P50H100 با ۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم (٦٣ درصد افزایش) اندازه‌گیری شد، در حالی‌که مقدار آن در تیمار شاهد ٤/٣ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (شکل ۳). افزایش فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک پس از مصرف کود مونوکلسیم فسفات (تریپل سوپرفسفات) به‌وسیله سایر پژوهشگران نیز گزارش شده‌است (Najafi & Towfighi, 2011; Najafi & Towfighi, 2014). این روند بیانگر آن است که کاربرد هم‌زمان منابع آلی و معدنی فسفر، نسبت به استفاده منفرد، کارایی بالاتری در افزایش فسفر در دسترس خاک دارد.

مواد هیومیکی و کودهای فسفری از طریق رقابت بر سر مکان‌های جذب و درنتیجه کاهش تثبیت فسفر در خاک، می‌توانند در افزایش کارایی مصرف کود فسفر و کاهش مصرف کودهای فسفر در نتیجه کاهش اثرهای زیست‌محیطی مؤثر باشند (Sepehr & Zebardast., 2013). لئوناردیت به‌عنوان منبع غنی از اسیدهای هیومیک، با کی‌لیت‌کردن یون‌های دو و سه‌ظرفیتی نظیر Ca^{2+}، Fe^{3+} و Al^{3+}، توانایی کاهش تثبیت فسفر را دارد. همچنین، ترکیبات هیومیکی موجود در آن می‌توانند از طریق کاهش pH موضعی در ناحیه ریزوسفر و تشکیل کمپلکس‌های آلی–فسفری، انحلال فسفر تثبیت‌شده را افزایش دهند (Rosolem *et al.*, 2024; Ge *et al.*, 2020). تحریک رشد ریزجانداران با توانایی تولید آنزیم فسفاتاز، از طریق فراهمی کربن آلی و شرایط زیستی مناسب، نقش مهمی در آزادسازی فسفر آلی دارد (Chen *et al.*, 2023). بنابراین، افزایش فسفر قابل‌جذب در تیمارهای حاوی لئوناردیت نتیجه‌ای از برهم‌کنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی در سطح خاک می‌تواند باشد. همبستگی مثبت و معنادار بین فسفر خاک و جمعیت میکروبی خاک غیرریزوسفر (r=0.45*) و خاک ریزوسفر (r=0.39*) در این تحقیق، نشان‌دهنده نقش فعالیت زیستی خاک در فراهمی فسفر است (جدول ٥).



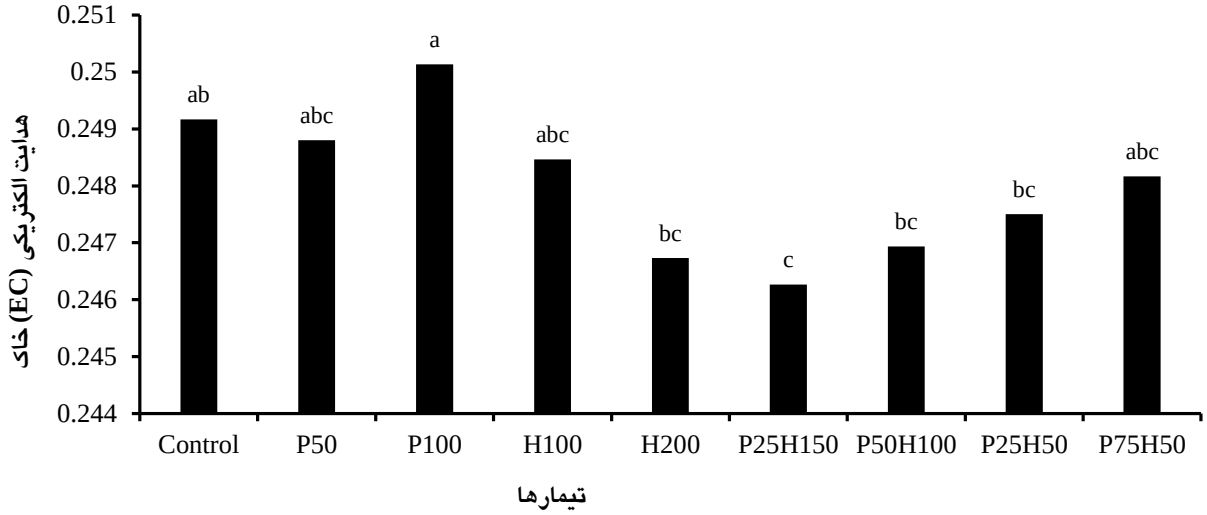
شکل ۴- تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک پس از برداشت گیاهان سیاهدانه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

غلظت پتاسیم قابل‌جذب گیاه در خاک

در این پژوهش، اثر تیمارهای مختلف لئوناردیت و تریپل سوپرفسفات بر پتاسیم قابل‌جذب خاک از نظر آماری معنادار نشد (جدول ۳).

قابلیت هدایت الکتریکی خاک

بررسی نتایج این پژوهش نشان داد که تیمارهای مختلف لئوناردیت و تریپل سوپرفسفات بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک تأثیری معنادار نداشتند (جدول ۳). اگرچه مقدار EC در برخی تیمارهای تلفیقی به‌صورت عددی اندکی کاهش یافت، اما تفاوت بین تیمارها از نظر آماری معنادار نبود. مقدار EC در تیمارها بین ۰/۲٤٦ تا ۰/۲۵۰ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود (شکل ۵)، که همگی در محدوده‌ای بسیار پایین‌تر از آستانه آسیب شوری برای گیاهان زراعی و دارویی قرار داشتند (Machado & Serralheiro, 2017).



شکل ۵- تأثیر تیمارهای مختلف بر EC محلول خاک پس از برداشت گیاهان سیاهدانه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

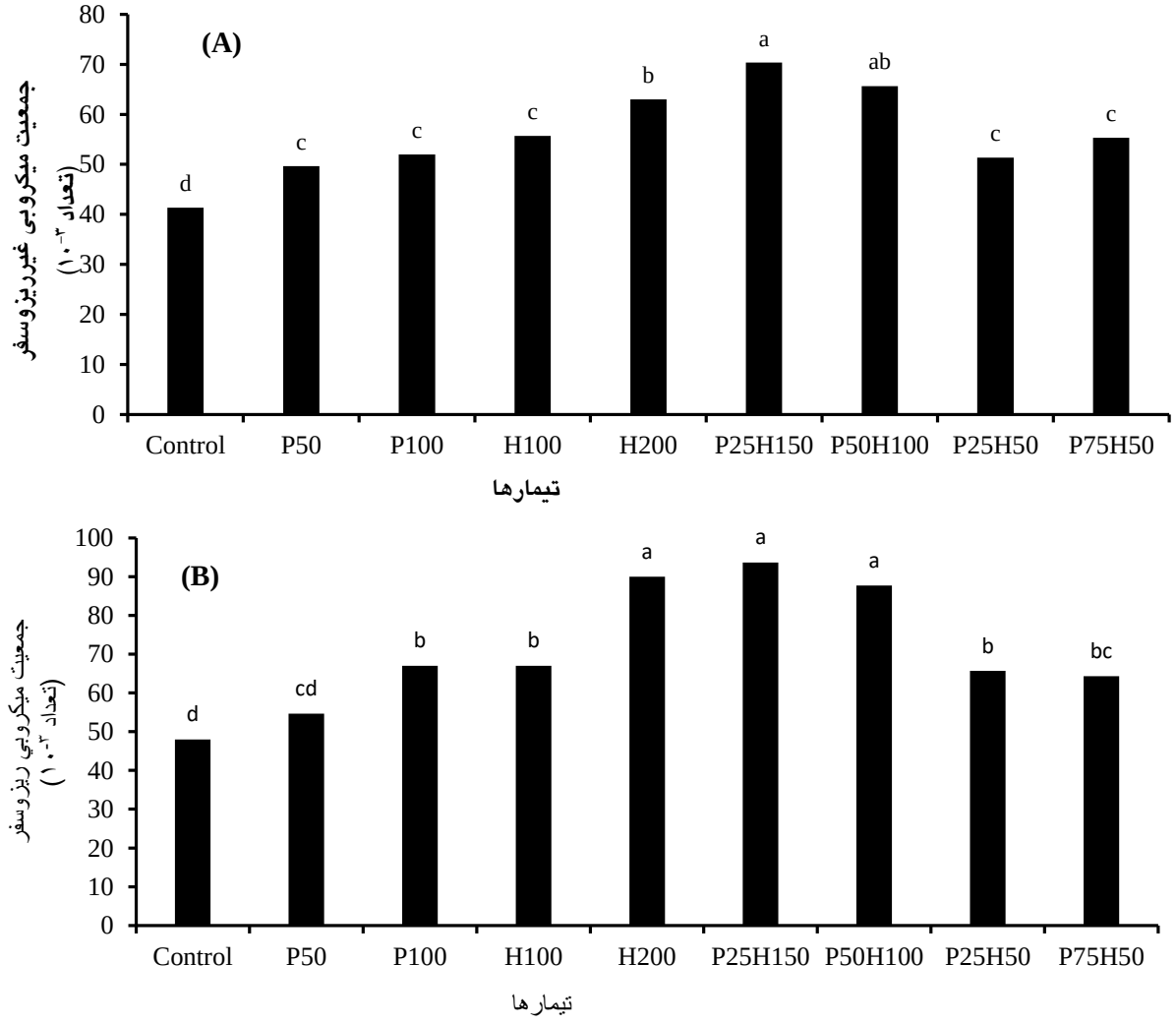
با توجه به عدم‌افزایش معنادار EC در تیمارهای مورد استفاده، به‌نظر می‌رسد استفاده از کود فسفری همراه با لئوناردیت، نه‌تنها موجب تجمع املاح محلول نشده، بلکه احتمالاً به‌دلیل افزایش جذب عناصر، از تجمع آن‌ها در محلول خاک جلوگیری کرده است. از سوی دیگر، همبستگی بین EC خاک با برخی صفات گیاهی و زیستی نیز اهمیت دارد. در این تحقیق، EC با جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر (r=-0.59**) و خاک غیرریزوسفر (r=-0.52**) رابطه منفی و معنادار داشت که نشان می‌دهد حتی در دامنه‌های پایین، افزایش جزئی EC می‌تواند بر زیست‌توده میکروبی تأثیر بازدارنده داشته باشد (جدول ۵). طبق نتایج پژوهشی، در خاک‌های نسبتاً شور، جمعیت و فعالیت ریزجانداران کاهش می‌یابد، حتی اگر میزان شوری از آستانه‌های بحرانی بالاتر نباشد (Haj-Amor *et al.*, 2022). همچنین، EC محلول خاک همبستگی‌های منفی و معنادار با نیتروژن کل خاک (r=-0.53**)، پتاسیم کل برگ (r=-0.40*)، و ماده آلی (r=-0.43**) داشت (جدول ۵). در مجموع، اگرچه EC تحت تأثیر تیمارها افزایش معناداری نداشت، اما بررسی تغییرات عددی آن در کنار همبستگی‌های معنادار با برخی صفات، اطلاعات مهمی درباره رفتار نظام خاک–گیاه در برابر ترکیب منابع آلی و معدنی ارائه می‌دهد.

جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر و غیرریزوسفر

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارها بر جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر و غیرریزوسفر در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ٤). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار P25H150 بیشترین جمعیت میکروبی را در خاک ریزوسفر و غیرریزوسفر به‌ترتیب با ۹۳/۷ و ۷۰/۳ ($CFU \times 10^{-4} \cdot g^{-1}$ خاک) و تیمار شاهد کمترین مقادیر به‌ترتیب ٤٨ و ٤١/٣ ($CFU \times 10^{-4} \cdot g^{-1}$ خاک) را داشت (شکل ٦). این نتایج نشان‌دهنده پاسخ مثبت زیست‌توده میکروبی به تلفیق منبع آلی (لئوناردیت) با منبع فسفر معدنی است، که با فراهم‌سازی محیط مناسب رشد، شرایط بهینه‌ای برای فعالیت زیستی در خاک فراهم کرده‌اند. ناحیه ریزوسفر به‌دلیل وجود ترشحات ریشه و ترکیبات آلی قابل تجزیه، معمولاً دارای جمعیت میکروبی بالاتری نسبت به خاک غیرریزوسفر است (*et al.*, 2022

Meier). در این پژوهش نیز، تفاوت بین دو ناحیه از نظر جمعیت میکروبی به‌وضوح مشاهده شد و تیمارهای حاوی لئوناردیت توانستند این تفاوت را تقویت کنند.

هیومیک اسید موجود در لئوناردیت به‌عنوان منبع کربنی پایدار، شرایط مناسبی را برای تکثیر ریزجانداران فراهم کرده است (Akimbekov *et al.*, 2020). هیومیک اسید با دارا بودن گروه‌های عاملی فعال (مانند گروه‌های کربوکسیل و فنول)، از طریق فرایندهای تبادل یونی و تجزیه شیمیایی، سبب آزادسازی اسیدهای آلی در ناحیه ریزوسفر می‌شود. این اسیدهای آلی به عنوان منابع کربنی در دسترس، بستر مناسبی برای تغذیه و رشد باکتری‌های وابسته به سیستم ریشه فراهم کرده و موجب افزایش جمعیت میکروبی می‌شوند (Li *et al.*, 2019). افزایش جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر در تیمارهای تلفیقی، همچنین می‌تواند با افزایش ریشه‌زایی گیاه و توسعه ناحیه ریزوسفر در ارتباط باشد؛ چرا که هیومیک اسید به‌دلیل ساختار آروماتیک و پایداری نسبی در برابر تجزیه زیستی، با القای ریشه‌زایی جانبی و توسعه ریشه‌های مویین، می‌تواند شرایط مناسبی برای افزایش چسبندگی، بقا و تراکم ریزجانداران در سطح ریشه فراهم کند (Olivares *et al.*, 2017).



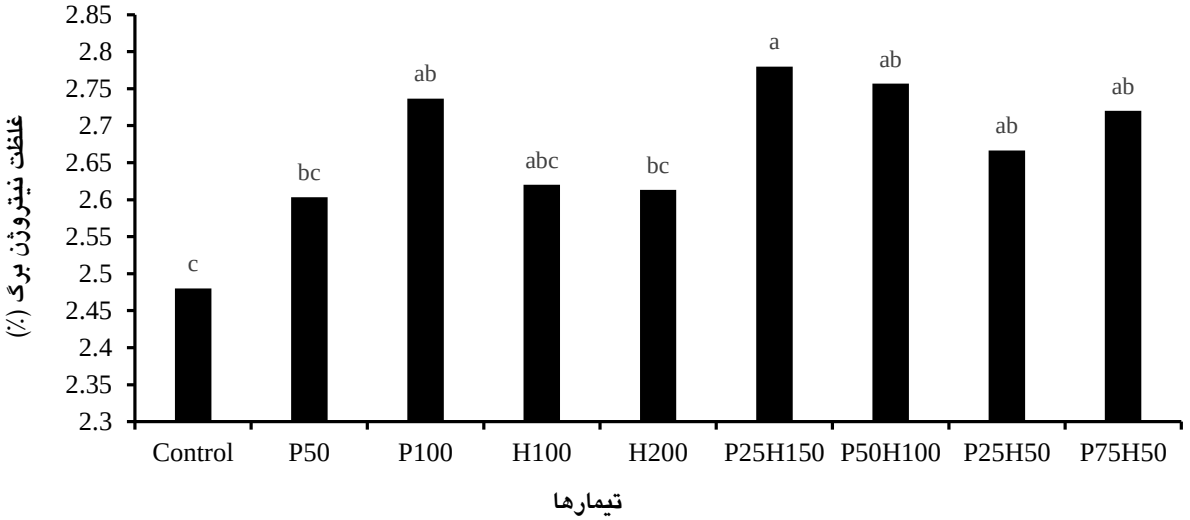
شکل ۶- تأثیر تیمارهای مختلف بر جمعیت میکروبی خاک غیرریزوسفر (A) و خاک ریزوسفر (B) پس از برداشت گیاهان سیاهدانه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر همبستگی‌های مثبت و معنادار با ماده آلی خاک (r=0.52**) و غلظت نیتروژن کل برگ (r=0.53**) داشت که نشان‌دهنده بهبود شرایط کربنی خاک و تغذیه نیتروژنی گیاه، هم‌زمان با افزایش زیست‌توده میکروبی بود. در مقابل، رابطه منفی و معنادار بین جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر و EC خاک (r=-0.59**) نشان می‌دهد که حتی در محدوده‌های پایین هدایت الکتریکی، افزایش جزئی نمکهای محلول می‌تواند اثر بازدارنده بر رشد ریزجانداران داشته باشد (جدول ۵). این حساسیت زیستی به شرایط شیمیایی، اهمیت کنترل شوری خاک در نظام‌های مدیریت تغذیه‌ای را برجسته می‌سازد (Zhang *et al.*, 2019). همچنین، جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر همبستگی‌های مثبت و معناداری با نیتروژن کل خاک (r=0.81**)، پتاسیم کل برگ (r=0.72**)، فسفر کل برگ (r=0.60**) و فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک (r=0.39*) داشت (جدول ۵). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از منابع آلی مانند لئوناردیت می‌تواند فعالیت میکروبی را به‌صورت مستقیم از طریق تغذیه و غیرمستقیم از طریق بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک افزایش دهد (Haj-Amor *et al.*, 2022). به‌طور کلی، تیمارهای حاوی لئوناردیت، به‌ویژه در تلفیق با سطوح پایین فسفر، بیشترین تأثیر را بر ارتقای جمعیت میکروبی خاک در هر دو ناحیه ریشه‌ای داشته‌اند.

غلظت نیتروژن برگ

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارها بر غلظت نیتروژن برگ سیاهدانه در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۳). بیشترین غلظت نیتروژن برگ در تیمار P25H150 با ۲/۷۸ درصد (۱۲ درصد افزایش) و کمترین آن در تیمار شاهد با ۲/٤۸ درصد بود. بعد از تیمار P25H150، تیمارهای P50H100 (۱۱ درصد افزایش)، P100 (۱۰ درصد افزایش)، P75H50 (۹/۷ درصد افزایش) و P25H50 (۸ درصد افزایش) به‌ترتیب با ۲/۷٦، ۲/۷٤، ۲/۷۲ و ۲/٦۷ درصد دارای درصد نیتروژن برگ بیشتری بودند و تفاوت معناداری با یکدیگر نداشتند (شکل ۷).

در خاک‌های سبک‌بافت که احتمال آبشویی نیترات بالا بوده و تغذیه نیتروژنی گیاه اغلب ناپایدار است، نقش مواد آلی مانند لئوناردیت در حفظ و تثبیت نیتروژن مهم است (Mirzaei Varoei et al., 2023; Mirzaei Varoei *et al.*, 2024). لئوناردیت به عنوان منبع غنی از هیومیک اسید با فراهم‌سازی بستر کربنی فعال، کاهش pH، کی‌لیت کردن نیتروژن و بهبود فعالیت میکروبی، موجب افزایش نیتروژن قابل‌جذب برای گیاه می‌گردد (El-Sayed et al., 2014; Sun *et al.*, 2020). هیومیک اسید به‌دلیل نقش محرک، هورمونی و کی‌لیت کنندگی، موجب افزایش غلظت نیتروژن برگ می‌شود (Khaled & Fawy, 2011). علاوه‌بر این، وجود نیتروژن در ساختار هیومیک اسید نیز باعث شده است که غلظت نیتروژن برگ افزایش یابد. همچنین بالابودن میزان نیتروژن را چنین می‌توان توجیه کرد که هیومیک اسید با تحریک جذب NO_3^- از راهِ افزایش بیان پروتئین حامل نیتروژن در سطح غشای سلولی و همچنین تغییر در میزان کاتیون‌ها جذب نیتروژن را افزایش می‌دهد. همچنین، می‌توان اثر هورمونی شبیه جیبرلین هیومیک اسید را در افزایش جذب نیتروژن دخیل دانست (Khaled & Fawy, 2011). همبستگی مثبت و معنادار نیتروژن خاک با نیتروژن برگ (r=0.50**) بیانگر آن است که افزایش فراهمی نیتروژن به‌وسیله لئوناردیت در خاک مستقیماً منجر به افزایش جذب آن به‌وسیله گیاه شده است (جدول ۵). همچنین، غلظت نیتروژن برگ همبستگی‌های مثبت و معنادار با پتاسیم برگ (r=0.53**)، فسفر برگ (r=0.68**)، پتاسیم خاک (r=0.63**) و فسفر خاک (r=0.57**) داشت که نشان‌دهنده تعامل تغذیه‌ای عناصر غذایی پرمصرف در گیاه است (جدول ۵).



شکل ۷- تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت نیتروژن برگ گیاه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن اسیدهای هیومیک به خاک می‌تواند جذب نیتروژن به‌وسیله گیاه را بهبود بخشد؛ این مزیت عمدتاً از طریق تأثیر مثبت هیومیک اسید بر فعالیت میکروبی خاک، کاهش هدررفت نیتروژن، و بهبود شرایط شیمیایی و فیزیکی خاک حاصل می‌شود (Lu *et al.*, 2022; Mirzaei Varoei et al., 2023; Zhang *et al.*, 2024). نیتروژن برگ همبستگی‌های مثبت و معنادار با جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر (r=0.53**) و غیرریزوسفر (r=0.57**) داشت (جدول ۵). افزایش همزمان نیتروژن خاک، نیتروژن برگ و جمعیت میکروبی نشان‌دهنده پویایی مؤثر چرخه نیتروژن در خاک و انتقال موفق آن به گیاه است. چنین روندی در بافت لوم شنی که معمولاً دچار ناپایداری تغذیه‌ای است، اهمیت کاربرد اصلاح‌گرهای آلی را دوچندان می‌سازد. مطالعات مشابه نیز نقش مواد آلی مانند لئوناردیت را در تقویت چرخه نیتروژن، افزایش زیست‌توده میکروبی و تثبیت تغذیه‌ای در خاک‌های با بافت سبک تأیید کرده‌اند (Sun *et al.*, 2020; Akimbekov *et al.*, 2020; Zhou et (al., 2024.

غلظت فسفر برگ

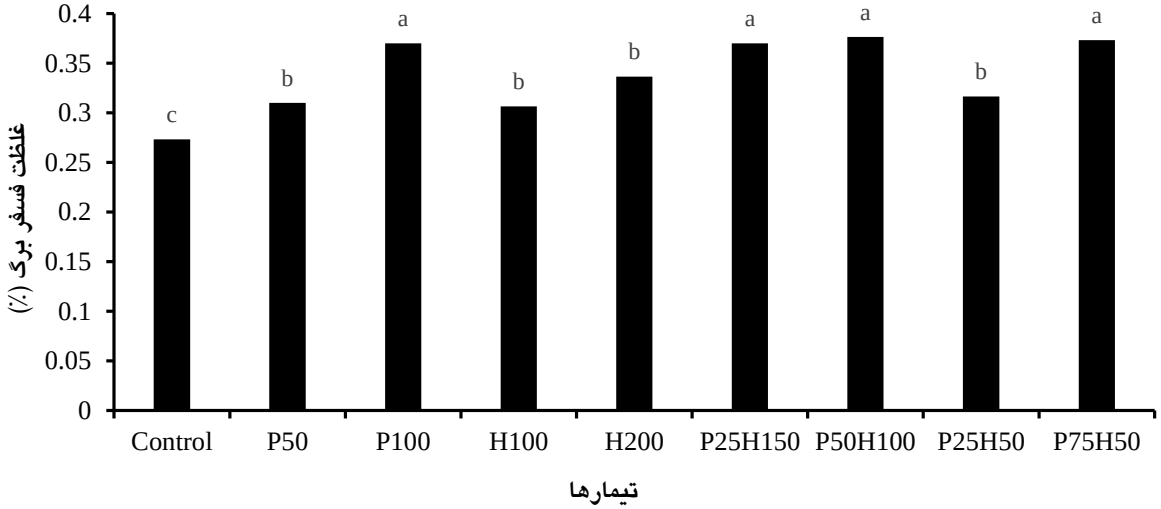
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر تیمارهای مورد استفاده بر غلظت فسفر برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت فسفر برگ در تیمار P50H100 (۳۸ درصد افزایش) با ۰/۳۷۷ درصد و کمترین غلظت فسفر برگ در تیمار شاهد با ۲/٤۸ درصد بود. تیمارهای P100 (۳٦ درصد افزایش) و P25H150 (۳٦ درصد افزایش) هر دو با ۰/۳۷ درصد داری بیشترین غلظت فسفر برگ سیاهدانه بودند و با تیمار P50H100 تفاوت معناداری نداشتند (شکل ۸).

در خاک‌های با بافت سبک که دارای ظرفیت پایین جذب و نگهداری عناصر هستند، فسفر به‌دلیل تحرک کم و تمایل بالا به تثبیت، معمولاً با محدودیت جذب مواجه است. همچنین، فسفر در چنین خاک‌هایی به‌سرعت از ناحیه ریشه دور می‌شود و جذب آن دشوارتر می‌شود. در این شرایط، کاربرد منابع آلی مانند لئوناردیت می‌تواند با تعدیل

موضعی pH و کی‌لیت کردن یون‌های مزاحم (مانند Ca^{2+})، جذب فسفر را تسهیل کند (Turan *et al.*, 2011; Kaya *et al.*, 2020; El-Kholy & Mohamed, 2025). هیومیک اسید از طریق ترکیب و ایجاد کمپلکس با آنزیم فسفاتاز موجب افزایش جذب فسفر در گیاه می‌شود (Yuan *et al.*, 2022). افزایش جذب فسفر را می‌توان به توسعه ریشه، ترشح اسیدهای آلی و یا ترشح یون پروتون داخل ریزوسفر، مرتبط دانست؛ علاوه‌بر این، می‌تواند به‌دلیل پاسخ به کود فسفر باشد (Yuan *et al.*, 2022).

طبق نتایج پژوهشی بر روی گیاه گلرنگ، کاربرد کود تریپل سوپرفسفات و لئوناردیت منجر به افزایش غلظت عناصر غذایی برگ این گیاه شد. افزایش غلظت فسفر برگ در این پژوهش به‌طور قابل‌توجهی مشاهده گردید، که نشان‌دهنده اثر مثبت کودهای فسفاتی و مواد هومیکی بر جذب فسفر است (Abedi et al., 2024). در این تحقیق، افزایش معنادار فسفر برگ در تیمارهای تلفیقی، حاصل عملکرد دوگانه مواد آلی و معدنی بود. به نظر می‌رسد تریپل سوپرفسفات منبع فسفر را فراهم کرده و لئوناردیت نیز از طریق کاهش تثبیت فسفر و افزایش رشد ریشه‌ها، جذب آن را تقویت کرده است.

همبستگی مثبت و معنادار بین فسفر خاک و فسفر برگ (r=0.75**) نشان داد که افزایش فسفر قابل‌جذب خاک در تیمارهای آلی–معدنی، مستقیماً به افزایش انتقال آن به بافت هوایی منجر شده است. همچنین، غلظت فسفر برگ همبستگی‌های معنادار با غلظت نیتروژن برگ (r=0.70**)، پتاسیم برگ (r=0.80**)، جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر (r=0.60**) و جمعیت میکروبی خاک غیرریزوسفر (r=0.62**) داشت. این همبستگی‌ها نشان‌دهنده تعامل تغذیه‌ای بین عناصر غذایی پرمصرف گیاه در شرایطی است که محیط ریشه به‌لحاظ شیمیایی و زیستی در وضعیت مساعدی قرار دارد. به نظر می‌رسد، حضور لئوناردیت با افزایش جمعیت میکروبی، و تقویت ریشه‌ها، جذب ترکیبی عناصر را تسهیل کرده است. به‌کارگیری اسیدهای هیومیک می‌تواند قابلیت دسترسی و جذب فسفر را در گیاهان به‌ویژه در خاک‌های سبک‌بافت افزایش دهد (Xiong *et al.*, 2023). در زیره سیاه استفاده از منابع فسفری همراه با مواد آلی مانند هیومیک اسید سبب بهبود عملکرد و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر گزارش شده است (Nassif *et al.*, 2023; Hafez *et al.*, 2024). نتایج مطالعه حاضر نیز مؤید آن است که در خاک لوم شنی، تلفیق لئوناردیت و منابع فسفری معدنی، راهبردی مؤثر برای ارتقاء تغذیه فسفر در سیاهدانه محسوب می‌شود.

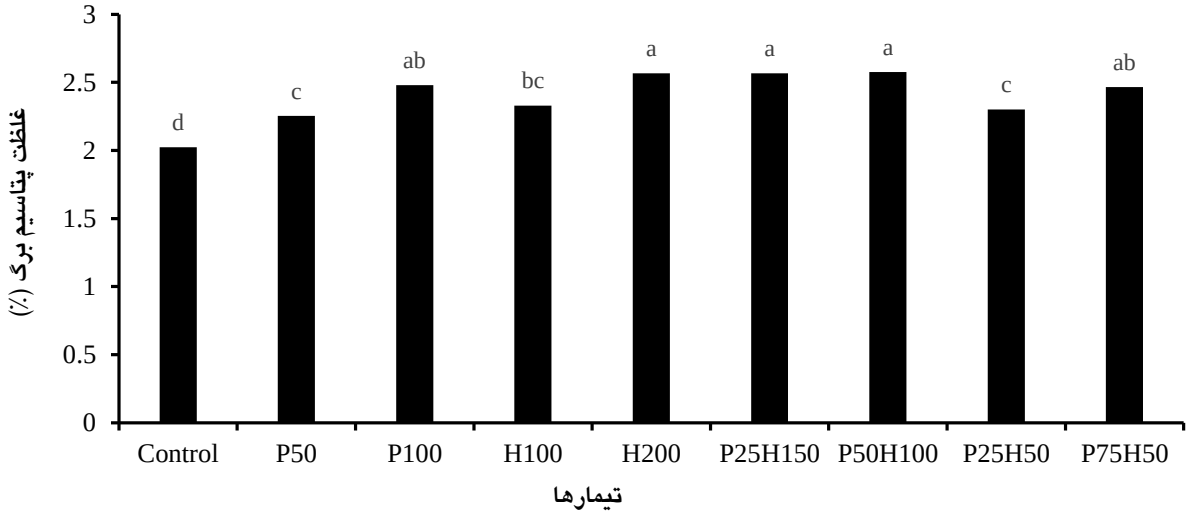


شکل ۸- تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت فسفر برگ گیاه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

غلظت پتاسیم برگ

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارهای مورد استفاده بر غلظت پتاسیم گیاه سیاهدانه در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین غلظت پتاسیم برگ سیاهدانه در تیمارهای H200، P25H150 و P50H100 به‌ترتیب ۲/۵٦۷ (۲٦/۹ درصد افزایش)، ۲/۵۷۷ (۲٦/۹ درصد افزایش) و ۲/۵٦۷ (۲۷ درصد افزایش) درصد و کمترین غلظت پتاسیم برگ در تیمار شاهد ۲/۰۲۳ درصد بود (شکل ۹). افزایش غلظت پتاسیم برگ گیاه سیاهدانه در خاک لوم شنی، نشان‌دهنده عملکرد موفق تیمارهای اصلاحی در تسهیل جذب این عنصر است. لئوناردیت با افزایش ظرفیت نگهداری کاتیون‌ها در خاک، پتاسیم را در بخش قابل‌تبادل حفظ می‌کند، از شسته شدن آن جلوگیری کرده و قابلیت جذب پتاسیم به‌وسیله گیاه را بهبود می‌بخشد (Rosolem *et al.*, 2018). هیومیک اسید با اسیدی‌کردن خاک سبب تسهیل در انحلال پتاسیم شده و میزان دسترسی به عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (Sanchez–Sanchez *et al.*, 2002).

پتاسیم برگ همبستگی‌های معناداری با جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر (r=0.72**) و غیرریزوسفر (r=0.75**) و EC محلول خاک (r=0.40*) داشت (جدول ۵). لئوناردیت با تحریک رشد ریشه، افزایش تماس ریشه با ذرات خاک، و تحریک زیست‌توده میکروبی، بستر مناسبی برای جذب عناصر غذایی از جمله پتاسیم فراهم می‌کند (Yang *et al.*, 2021). همبستگی‌های مثبت و معنادار غلظت پتاسیم برگ با غلظت نیتروژن برگ (r=0.50**)، غلظت فسفر برگ (r=0.80**) و فسفر قابل جذب گیاه در خاک (r=0.62**) نیز تأییدی بر عملکرد تغذیه‌ای همزمان این عناصر است (جدول ۵). این همبستگی‌ها حاکی از آن هستند که تیمارهای مؤثر، علاوه‌بر تأمین پتاسیم، شرایط جذب هماهنگ سایر عناصر غذایی پرمصرف را نیز فراهم کرده‌اند.



شکل ۹- تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت پتاسیم برگ گیاه. P، فسفر، H، لئوناردیت، مقادیر جلوی P و H بیانگر مقدار مصرف شده از این دو منبع کودی بر حسب کیلوگرم بر هکتار است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معناداری با یکدیگر با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

جدول ۵ - ضرایب همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده.

	درصد ماده آلی (۱)	جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر (۲)	جمعیت میکروبی غیرریزوسفر (۳)	EC (٤)	پتاسیم فراهم خاک (٥)	فسفر فراهم خاک (٦)	نیتروژن کل خاک (۷)	پتاسیم کل برگ (۸)	فسفر کل برگ (۹)	نیتروژن کل برگ (۱۰)
۱	۱									
۲	۰/۵۹٤**	۱								
۳	۰/۵۲۱**	۰/۹۱۱**	۱							
٤	-۰/٤۲٦*	-۰/۵۹۰**	-۰/۵۲۸**	۱						
٥	۰/۳٥۰ns	۰/۳۰۳ns	۰/۳۲۷ns	-۰/۳۰٥ns	۱					
٦	۰/۰٦۱ns	۰/۳۹۳*	۰/٤٤٥*	-۰/۲۳٦ns	-۰/۲۱۹ns	۱				
۷	۰/٦۱٦**	۰/۸۰٦**	۰/٦۹۹**	-۰/۵۳۱**	۰/۲۹٥ns	۰/۳٤۷ns	۱			
۸	۰/۳۵۷ns	۰/۷۲۱**	۰/۷۵۳**	-۰/۳۹۹*	۰/۲۲٦ns	۰/٦۱۹**	۰/۵۹٦**	۱		
۹	۰/۳۲٦ns	۰/۵۹٦**	۰/٦۲۲**	-۰/۲۷۰ns	۰/۱۹٦ns	۰/۷٤۹**	۰/۵۱٦**	۰/۷۹۷**	۱	
۱۰	۰/۲۳۲ns	۰/۵۳۳**	۰/۵۷۲**	-۰/۲۸۰ns	۰/٦۲۷**	۰/۵٦٦**	۰/۵۰۰**	۰/۵۲۹**	۰/٦۷۹**	۱

* و**به‌ترتیب وجود تفاوت معنادار در سطح احتمال خطای پنج و یک درصد، ns عدم وجود تفاوت معنادارمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد توأم تریپل سوپرفسفات و لئوناردیت، به‌ویژه در سطح ۲۵ کیلوگرم فسفر و ۱۵۰ کیلوگرم لئوناردیت بر هکتار، به‌طور قابل‌توجهی موجب بهبود ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک لوم شنی و افزایش جذب عناصر غذایی در گیاه دارویی سیاهدانه شد. همچنین، لئوناردیت به‌تنهایی در سطح ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار نیز سبب بهبود شرایط خاک و افزایش غلظت عناصر غذایی شد. افزایش غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم برگ سیاهدانه، همراه با بهبود مقادیر نیتروژن کل، فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک و ماده آلی خاک، و افزایش جمعیت میکروبی، نشان‌دهنده تأثیر مثبت این ترکیب کودی یا لئوناردیت به‌تنهایی بر پایداری تغذیه‌ای و بهینه‌سازی جذب عناصر در گیاه بود. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از لئوناردیت و تریپل سوپرفسفات در مقادیر بهینه می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر برای بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش کارایی تغذیه‌ای گیاه دارویی سیاهدانه و گیاهان دارویی مشابه، به‌ویژه در خاک‌های با مواد آلی کم و در مناطق مشابه، توصیه گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان از مساعدت و همکاری شرکت قیزیل توپراق سهند و آقای مهندس یاسر طالبی برای کلیه زحمات و حمایت‌هایشان تشکر و قدردانی می‌نمایند.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

Abedi, M., Shafagh-Kolvanagh, J., Zehtab Salmasi, S. & hemati, A. (2024). Effect of phosphate and humic fertilizers on quantitative, qualitative and nutritional indicators of safflower plant leaves. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34(2), 213-226. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/saps.2023.55579.3007

Abou El-Leel, O.F., Maraei, R. W. & Aly, A.A.E.H. (2019). Studying the response of *Nigella sativa* plants to different fertilizers. *Fascicula Biologie*, *26*(1), 14–20.

Akimbekov, N., Qiao, X., Digel, I., Abdieva, G., Ualieva, P. & Zhubanova, A. (2020). The effect of leonardite-derived amendments on soil microbiome structure and potato yield. *Agriculture*, *10*(5), 147. https://doi.org/10.3390/agriculture10050147

Amadou, I., Houben, D. & Faucon, M.P. (2021). Unravelling the Role of Rhizosphere Microbiome and Root Traits in Organic Phosphorus Mobilization for Sustainable Phosphorus Fertilization. A Review. *Agronomy*, *11*(11): 2267. https://doi.org/10.3390/agronomy11112267

Ben-David, A., & Davidson, C. E. (2014). Estimation method for serial dilution experiments. *Journal of Microbiological Methods*, 107, 214–221. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2014.08.023

Blake, G.R. & Hartge, K.H. (1986). Bulk density. pp. 363–382. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed.). American

Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. https://doi.org/10.1002/gea.3340050110

Chen, S., Wang, L., Zhang, S., Li, N., Wei, X., Wei, Y., Wei, L., Li, J., Huang, S., Chen, Q., Zhang, T. & Bolan, N.S. (2023). Soil organic carbon stability mediate soil phosphorus in greenhouse vegetable soil by shifting phoD-harboring bacterial communities and keystone taxa. *Science of the Total Environment*, 873, 162400. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162400

El-Kholy, A.S.M. & Mohamed, E. (2025). Impact of humic acid and phosphorus levels on yield and phosphorus use efficiency in faba bean cultivated under sandy soil conditions. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 52(1), 21–36. https://doi.org/10.21608/zjar.2025.416477

Elsayed, S.A., Mussa, E.S.E., Khalifa, D.M. & Ghazal, M.F. (2022). Improvement of sandy soil fertility by applying some organic amendments and plant growth-promoting bacteria and their reflection on crop productivity. *Middle East Journal of Agriculture Research, 11*(4), 1376-1398. https://doi.org/10.36632/mejar/2022.11.4.93

El-Sayed, S.A.A., Hellal, F.A. & Mohamed, K.A.S. (2014). Effect of humic acid and phosphate sources on nutrient uptake and yield of plants (in calcareous soils). *European International Journal of Science and Technology*, 3(9), 168-177.

Gardner, W.H. (1986). Water content. Pp. 493–544. In: *Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed.). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c21

Ge, X., Wang, L., Zhang, W. & Putnis, C.V. (2020). Molecular understanding of humic acid-limited phosphate precipitation and transformation. *Environmental Science & Technology, 54*(1), 207–215. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05145

Gee, G.W., & Or, D. (2002). Particle size analysis. Pp. 201–214. In: Dane J.H. and Topp G.C. (Eds), *Methods of soil analysis*. Part 4. *Physical methods*. SSSA Book Series No. 5, Madison, WI. USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12

Hafez, Y.A.M., Kenawy, A.G.M. & Shehata, A.M. (2024). The effect of microbial inoculants, humic acid and phosphorus on the production and quality characteristics of *Nigella sativa* plants. *Journal of Plant Production*, 15(7), 409–415. https://doi.org/10.21608/jpp.2024.302606.1353

Haj-Amor, Z., Araya, T., Kim, D.G., Bouri, S., Lee, J., Ghiloufi, W., Yang, Y., Kang, H., Jhariya, M.K., Banerjee, A. & Lal, R. (2022). Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review. *Science of the Total Environment*, 843, 156946. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022

Hopkins, B. & Ellsworth, J. (2003). Phosphorus nutrition in potato production. *Idaho Potato Conference*, 22-23. Idaho University, USA.

Ijaz, H., Tulain, U.R., Qureshi, J., Danish, Z., Musayab, S., Akhtar, M.F., Saleem, A., Khan, K. K., Zaman, M., Waheed, I., Khan, I.A. & Abdel-Daim, M.M. (2017). *Nigella sativa* (Prophetic Medicine): A Review. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences,* 30(1), 229-234.

Jahan, M., Sohrabi, R., Doaee, F. & Amiri, M.B. (2013). Effect of hydrogel in soil and foliar application of acid humic on some agro ecological characteristic of bean in Mashhad. *Journal of Agroecology*, 2, 71-90.

Kandra, B., Tall, A., Vitková, J., Procházka, M. & Šurda, P. (2024). Effect of humic amendment on selected hydrophysical properties of sandy and clayey soils. *Water*, 16(10), 1338. https://doi.org/10.3390/w16101338

Kaya, C., Şenbayram, M., Akram, N.A., Ashraf, M., Alyemeni, M.N. & Ahmad, P. (2020). Sulfur-enriched leonardite and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in maize. *Scientific Reports*, 10(1), 12613. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62669-6

Kaya, C., Şenbayram, M., Akram, N.A., Ashraf, M., Alyemeni, M.N. & Ahmad, P. (2020). Sulfur-enriched leonardite and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in maize (*Zea mays* L.). *Scientific Reports*, 10, 6432. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62669-6

Khaled, H. & Fawy, H.A. (2011). Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. *Soil and Water Research*, 6, 21-29. https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR

Li, P., Liu, J., Jiang, C., Wu, M., Liu, M. & Li, Z. (2019). Distinct successions of common and rare bacteria in soil under humic acid amendment–A microcosm study. *Frontiers in Microbiology*, 10. https://10.3389/fmicb.2019.02271

Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

Liu, F.C., Xing, S.J., Duan, C.H., Du, Z.Y., Ma, H.L. & Ma, B.Y. (2010). Nitrate nitrogen leaching and residue of humic acid fertilizer in field soil. *Huan Jing Ke Xue*, 31(7), 1619–1624.

Liu, Y., Zhang, K., Zhang, H., Zhou, K., Chang, Y., Zhan, Y., Pan, C., Shi, X., Zuo, H., Li, J. & Wei, Y. (2023). Humic acid and phosphorus fractions transformation regulated by carbon-based materials in composting steered its potential for phosphorus mobilization in soil. *Journal of Environmental Management*, 0301-4797. https://10.1016/j.jenvman.2022.116553

Lopes, A.S. (1996). Soils under Cerrado: A success story in soil management. *International Fertilizer Industry Association*, 10(2), 1-10.

Lu, Q., Jiao, C., Zuo, J., Guo, Z. & Huang, J. (2022). The impact of humic acid fertilizers on crop yield and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. *Agriculture*, 14(12), 2763. https://doi.org/10.3390/agronomy14122763

Machado, R.M.A. & Serralheiro, R.P. (2017). Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae, 3*(2), 30. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030

Marsac, R., Catrouillet, C., Davranche, M., Bouhnik-Le Coz, M., Briant, N., Janot, N., Otero-Fariña, A., Groenenberg, J., Pédrot, M., & Dia, A. (2021). Modeling rare earth elements binding to humic acids with model VII. *Chemical Geology*, 567, 120099. https://10.1016/j.chemgeo.2021.120099

Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Third Edition, Academic Press.

Meier, I. C., Finér, L., Müller, C. & Rousk, J. (2022). Global magnitude of rhizosphere effects on soil microbial communities and carbon cycling in natural terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 13, 7033. https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-9

Mirzaei Varoei, M., Oustan, S., Reyhanitabar, A., & Najafi, N. (2023). Preparation, characterization and nitrogen availability of nitrohumic acid as a slow-release nitrogen fertilizer. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(14), 3345–3361. https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2232678

Mirzaei Varoei, M., Oustan, Sh., Reyhanitabar, A. & Najafi, N. (2024). Effect of application of nitrogen-enriched humic acid (NHA) on morphological and physiological

characteristics of maize (Single Cross 704). *Water and Soil Science*, 34(1), 91–111. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22034/ws.2021.49033.2501

Najafi, N., & Towfighi, H. (2011). Effects of soil moisture regimes and phosphorus fertilizer on available and inorganic P fractions in some paddy soils, North of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 42(2), 257–69. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22059/ijswr.2012.29285

Najafi, N., & Towfighi, H. (2014). Changes in available phosphorus and inorganic native phosphorus fractions after waterlogging in the paddy soils of north of Iran. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, 18(67), 151–163. (in Persian with English abstract) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1393.18.67.24.7

Nassif, A.H., Al-Zubaidy, N.A.J. & Abd, R.M. (2023). Improving the growth of black cumin (*Nigella sativa* L.) by humic acid and Trichoderma harzianum as biofertilizer. Modern Phytomorphology, 17, 37–40. https://doi.org/10.5281/zenodo.7939704

Olivares, F.L., Busato, J.G., de Paula, A.M., da Silva Lima, L., Aguiar, N. & Canellas, L.P. (2017). Plant growth promoting bacteria and humic substances: crop promotion and mechanisms of action. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture,* 4, 30. https://doi.org/10.1186/s40538-017-0112-x

Page, A.L., Miller, R.H. & Keeney, D.R. (1982). *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties*. Second Edition, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. https://doi.org/10.1002/jpln.19851480319

Pikuła, D. (2024). The use of products from leonardite to improve soil quality in condition of climate change. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 27(1), 15–22. https://doi.org/10.2478/ahr-2024-0003

Rosolem, C.A., Almeida, D.S., Rocha, K.F. & Bacco, G.H.M. (2018). Potassium fertilisation with humic acid coated KCl in a sandy clay loam tropical soil. *Soil Research*, 56(3), 244–251. https://doi.org/10.1071/SR17214

Rosolem, C.A., Nascimento, C.A.C., Bertolino, K.M. & Picoli, L.B. (2024). Humic acid enhances phosphorus transport in soil and uptake by maize. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(2), 401–414. https://doi.org/10.1002/jpln.202300413

Ryan, J., Estefan, G. & Rashid, A. (2001). *Soil and plant analysis laboratory manual*. Second Edition, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Beirut, Lebanon. https://hdl.handle.net/20.500.11766/67563

Sanchez–Sanchez, A., Sanchez–Anderu, J., Juarez, M., Jorda, J. & Bermudez D. (2002). Humic substances and amino acid improve effectiveness of chelate FeEDDHA in lemons trees. *Journal of Plant Nutrition*, 25(11), 2433-2442. https://doi.org/10.1081/PLN-120014705

Sepehr, I. & Zebardast, V.R. (2013). Effect of humic acid on phosphorus absorption behavior in a calcareous soil. *Water and Soil*, 27(4), 720-731. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28095

Sun, Q., Li, X., Zhang, J., Wang, X. & Liu, Y. (2020). Humic acids derived from Leonardite to improve enzymatic activities and bioavailability of nutrients in a calcareous soil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(5), 144–152. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201305.5612

Swify, S., Mažeika, R. & Volungevičius, J. (2023). Mineral nitrogen release patterns in various soil and texture types and the impact of urea and coated urea potassium humate on barley biomass. *Soil Systems, 7*(4), 102. https://doi.org/10.3390/soilsystems7040102

Takahashi, Y. & Katoh, M. (2023). Root response and phosphorus uptake with enhancement in available phosphorus level in soil in the presence of water-soluble organic matter deriving from organic material. *Journal of Environmental Management*, 322, 116038. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116038

Tiwari, J., Ramanathan, A.L., Bauddh, K. & Korstad, J. (2023). Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems- A review. *Pedosphere*, 33(2), 237–249. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.008

Turan, M.A., Aşık, B.B., Katkat, A.V. & Çelik, H. (2011). The effects of soil-applied humic substances on the dry weight and mineral nutrient uptake of maize plants under soil-salinity conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(1), 171–177. https://doi.org/10.15835/nbha3915812

Vanlauwe, B., Descheemaeker, K., Giller, K.E., Huising, J., Merckx, R., Nziguheba, G., Wendt, J. & Zingore, S. (2015). Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: Unravelling local adaptation. *Soil*, 1(1), 491–508. https://doi.org/10.5194/soil-1-491-2015

Xiong, Q., Wang, S., Lu, X., Xu, Y., Zhang, L., Chen, X. & Ye, X. (2023). The effective combination of humic acid phosphate fertilizer regulating the form transformation of phosphorus and the chemical and microbial mechanism of its phosphorus availability. *Agronomy*, 13(6), 1581. https://doi.org/10.3390/agronomy13061581

Yang, F., Tang, C. & Antonietti, M. (2021). Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms. *Chemical Society Reviews Journal*. 50, 6221–6239. https://doi.org/10.1039/D0CS01363C

Yuan, Y., Gai, S., Tang, C., Jin, Y., Cheng, K., Antonietti, M. & Yang, F. (2022). Artificial humic acid improves maize growth and soil phosphorus utilization efficiency. *Applied Soil Ecology*, 179, 104587. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104587

Zhang, W., Liu, X., Tang, W. & Zhu, S. (2024). Humic acid urea enhanced productivity and reduced active nitrogen loss in summer maize-winter wheat cropping system: A field lysimeter experiment. Agriculture. *Ecosystems & Environment*, 375, 108044. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108044

Zhang, W.W., Wang, C., Xue, R. & Wang, L.J. (2019). Effects of salinity on the soil microbial community and soil fertility. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(6), 1360–1368. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62077-5

Zhou, L., Chu, J., Zhang, Y., Wang, Q., Liu, Y. & Zhao, B. (2024). Impact of a single lignite humic acid application on soil properties and microbial dynamics in Aeolian sandy soils: A fourth-year study in semi-arid Inner Mongolia. *Agronomy*, 14(11), 2581. https://doi.org/10.3390/agronomy14112581