



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



(OPEN ACCESS)

Effect of triple superphosphate and leonardite application on the correlation between selected soil properties and yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.)

Mahsa Abedi¹, Jalil Shafagh Kolvanqh^{*2}, Arash Hemati³

1. Ph.D. Student in Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: mahsaabedi@tabrizu.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Plant Ecophysiology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: shafagh.jalil@gmail.com
3. Assistant Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tabriz, Iran. E-mail: ar_hemati@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 03.14.2025
Revised: 07.29.2025
Accepted: 08.30.2025

Keywords:
C/N ratio,
Grain yield,
Humic acid,
Phosphorus,
Safflower

ABSTRACT

Background and Objective: One of the key factors in improving crop management is evaluating the processes of yield formation and the plant nutrition system. The amount of soil organic matter, the activity of soil organisms, and the availability of essential elements are all considered influential in determining crop yield. This study aimed to assess the impact of varying levels and combinations of leonardite (a rich source of humic acid) and triple superphosphate on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) yield.

Materials and Methods: The experiment was conducted during the 2021–2022 growing season using a randomized complete block design (RCBD) in a clay loam soil cultivated with safflower in the Parchin region of Ardabil Province, Iran. The study included nine treatments: control (no fertilizer), 100 kg/ha triple superphosphate (P100), 50 kg/ha triple superphosphate (P50), 200 kg/ha leonardite (H200), 100 kg/ha leonardite (H100), 50 kg/ha triple superphosphate + 100 kg/ha leonardite (P50H100), 25 kg/ha triple superphosphate + 150 kg/ha leonardite (P25H150), 75 kg/ha triple superphosphate + 50 kg/ha leonardite (P75H50), and 25 kg/ha triple superphosphate + 50 kg/ha leonardite (P25H50). Measured parameters included microbial population indices in the rhizosphere and non-rhizosphere soil, microbial R/S ratio, soil nitrogen content, C/N ratio, pH, grain yield, biological yield, and harvest index of safflower. Data were analyzed using SPSS software, and correlations between soil and plant traits were also evaluated.

Results: The H200 treatment resulted in the highest percentage of soil organic carbon, while the P25H150 treatment had the highest soil nitrogen content. Treatments P25H150 and H200 showed the lowest soil C/N ratio, and P25H150 exhibited the highest rhizosphere microbial population and microbial R/S ratio. The P50H100 treatment produced the highest grain yield, biological yield, and harvest index. A significant positive correlation ($P < 0.01$) was observed between grain and biological yields of safflower

and both the rhizosphere microbial population and the microbial R/S ratio. Conversely, grain and biological yields were significantly and negatively correlated ($P < 0.01$) with the soil C/N ratio and pH.

Conclusion: Among the treatments applied in this study, H200 and P25H150 had the most substantial effects on soil-related traits, while P25H150, P50H100, and H200 showed the most significant improvements in safflower yield indicators. The results demonstrate that leonardite, as a rich source of humic acid, can effectively enhance phosphorus use efficiency, thereby reducing the need for triple superphosphate fertilizer. To achieve optimal safflower yield while preserving soil health and supporting sustainable production, integrated treatments combining leonardite with triple superphosphate—particularly P25H150 and P50H100—are recommended.

Cite this article: Abedi, Mahsa, Shafagh Kolvanqh, Jalil, Hemati, Arash. 2026. Effect of triple superphosphate and leonardite application on the correlation between selected soil properties and yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 16 (1), 67-92.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23441.2187

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



بررسی اثر کاربرد سوپرفسفات تریپل و لئوناردیت بر همبستگی بین برخی ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.)

مهسا عابدی^۱، جلیل شفق کلوانق^{۲*}، آرش همتی^۳

۱. دانشجوی دکتری اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mahsaabedi@tabrizu.ac.ir
 ۲. نویسنده مسئول، استاد گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: shafagh.jalil@gmail.com
 ۳. استادیار، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. رایانامه: ar_hemati@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸	سابقه و هدف: از نکات کلیدی بهبود مدیریت زراعی، ارزیابی فرایندهای تشکیل عملکرد و سیستم تغذیه گیاه است. میزان ماده آلی خاک، فعالیت موجودات خاکی و میزان دسترسی به عناصر خاک از عوامل تأثیرگذار در عملکرد گیاه محسوب می‌شوند. این پژوهش با هدف کاهش و یا جایگزینی مصرف کود فسفردار با لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) در راستای نیل به سوی کشاورزی پایدار، کاهش هزینه‌ها و افزایش عملکرد، در جهت بررسی تأثیر سطوح مختلف ترکیب لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) و سوپرفسفات تریپل بر عملکرد گیاه گلرنگ (<i>Carthamus tinctorius</i> L.) انجام گرفت.
واژه‌های کلیدی: اسید هیومیک، عملکرد دانه، فسفر، گلرنگ، نسبت C/N	مواد و روش‌ها: این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در خاک رسی-لومی تحت کشت گیاه گلرنگ در منطقه پرچین استان اردبیل با ۹ تیمار: شاهد، سوپرفسفات تریپل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (P_{100})، سوپرفسفات تریپل ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P_{50})، لئوناردیت ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (H_{200})، لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (H_{100})، سوپرفسفات تریپل ۵۰ کیلوگرم و لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار ($P_{50}H_{100}$)، سوپرفسفات تریپل ۲۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار ($P_{25}H_{150}$)، سوپرفسفات تریپل ۷۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم در هکتار ($P_{75}H_{50}$) و سوپرفسفات تریپل ۲۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم در هکتار ($P_{25}H_{50}$) انجام شد. شاخص‌های جمعیت میکروبی ریزوسفری و غیر ریزوسفری، نسبت R/S میکروبی، کربن، نیتروژن، نسبت C/N و pH در خاک و شاخص‌های عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت در گیاه گلرنگ اندازه‌گیری شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و همبستگی صفات از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

یافته‌ها: تیمار H200 بیش‌ترین درصد کربن آلی، تیمار P₂₅H₁₅₀ بیش‌ترین درصد نیتروژن خاک، تیمارهای P₂₅H₁₅₀ و H₂₀₀ کم‌ترین نسبت C/N خاک و تیمار P₂₅H₁₅₀ بیش‌ترین مقدار جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S میکروبی خاک را داشت. تیمار P₅₀ H₁₀₀ بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت را داشت. بین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی گلرنگ همبستگی مثبت و معنی‌داری ($P < 0.01$) با جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S میکروبی وجود داشت. هم‌چنین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی همبستگی منفی و معنی‌داری ($P < 0.01$) با نسبت C/N و pH خاک داشتند.

نتیجه‌گیری: در بین تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش، تیمارهای H₂₀₀ و P₂₅H₁₅₀ در صفات خاکی و تیمارهای P₂₅H₁₅₀، P₅₀H₁₀₀ و H₂₀₀ در شاخص‌های عملکردی گلرنگ، بالاترین سطح معنی‌داری را نشان دادند. نتایج نشان داد لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) توانست موجب کاهش مصرف کود سوپرفسفات تریپل شود. توصیه می‌شود جهت دستیابی به عملکرد مناسب گلرنگ با حفظ سلامت خاک و تولید پایدار، تیمارهای تلفیقی لئوناردیت با سوپرفسفات تریپل مانند P₂₅H₁₅₀ و P₅₀ H₁₀₀ مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: عابدی، مهسا، شفق کلوانق، جلیل، همتی، آرش (۱۴۰۵). بررسی اثر کاربرد سوپرفسفات تریپل و لئوناردیت بر همبستگی بین برخی ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۶ (۱)، ۹۲-۶۷.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23441.2187



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گلرنگ گیاه علفی یکساله با نام علمی *Carthamus tinctorius* L. (Asteraceae) است (۱). این گیاه حدوداً در ۶۰ کشور جهان کشت می‌شود (۲). روغن گلرنگ مصارف تغذیه‌ای و صنعتی دارد و اندام‌های آن برای مصارف دارویی کشت می‌گردد (۳). کشت گلرنگ در ایران برای مصارف روغنی از سال ۱۳۳۶ آغاز شده است (۴). طبق آمارهای موجود، در سال‌های اخیر کشت گلرنگ در کشور توسعه چشمگیری داشته است. بر اساس گزارش جهاد کشاورزی (۵)، سطح زیر کشت این محصول در کشور به ۱۱،۳۳۵ هکتار رسیده و میانگین عملکرد آن ۸۲۸ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است. همچنین، سطح زیر کشت گلرنگ در استان اردبیل به بیش از ۱۰۰ هکتار افزایش یافته است. گلرنگ به دلیل مقاومت بالاتر نسبت به خشکی در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی، قابلیت کشت به‌صورت دیم را دارد. این ویژگی موجب گسترش سطح زیر کشت آن در کشور شده است. با این حال، کشت گلرنگ در ایران با چالش‌هایی از جمله کمبود منابع آبی، مشکلات مربوط به کیفیت خاک و شیوع آفات مواجه است که می‌توانند تولید و بهره‌وری گلرنگ را تحت تأثیر منفی قرار دهند (۳).

فسفر یکی از عناصر ضروری برای گیاه است و نیاز گیاه به آن در فاز زایشی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ بنابراین، مدیریت صحیح مصرف فسفر برای تأمین نیاز گیاه در مراحل حساس رشد، ضروری است (۶). فسفر در ذخیره و انتقال انرژی و همچنین رشد و نمو گیاهان نقش مهمی ایفا می‌کند (۷). بسنده نبودن جذب فسفر توسط ریشه، محدودیت مهمی در رشد گیاه به شمار می‌رود (۸). اثر مثبت کود فسفوری بر گلرنگ از طریق اثر مستقیم عنصر فسفر در فرآیندهای سوخت و ساز گیاه از

جمله در تقسیم و رشد سلول، انتقال انرژی، ساخت مواد آلی، تنفس و فتوسنتز که بر اجرای عملکرد و در نتیجه بر افزایش عملکرد دانه منعکس می‌شود (۹).

به دلیل آهکی بودن و مناسب نبودن pH بیش‌تر خاک‌های ایران، اغلب کمبود فسفر در این خاک‌ها دیده می‌شود. به‌طوری‌که بخشی از فسفر محلول در خاک‌های آهکی به شکل غیرقابل جذب تبدیل می‌شود (۱۰). به دلیل غیرقابل جذب شدن فسفر، تقریباً ۱۵ تا ۳۰ درصد فسفر استفاده شده در خاک توسط گیاه جذب می‌شود و بقیه آن در خاک تثبیت و تجمع می‌یابد و از دسترس گیاه خارج می‌شود (۱۱).

لئوناردیت به عنوان منبع غنی از مواد هیومیک شناخته شده است. مواد هیومیک مخلوطی از ترکیبات آلی مختلف هستند که از باقی‌مانده گیاهان و حیوانات حاصل می‌شوند و شامل سه بخش اسید فولیک، اسید هیومیک و هومین هستند (۱۲). اسید هیومیک (مشتق‌شده از لئوناردیت) با بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و فراهم کردن محیط مناسب‌تر برای رشد میکروارگانیسم‌های مفید، می‌تواند به طور غیرمستقیم موجب افزایش فعالیت زیستی خاک و تسهیل آزادسازی عناصر غذایی به ویژه فسفر شود (۱۱). اسید هیومیک با شکستن پیوندهای Ca-P در خاک‌های قلیایی و پیوندهای Al-P یا Fe-P در خاک‌های اسیدی می‌تواند فسفر را از حالت تثبیت شده خارج سازد؛ این امر می‌تواند دلیلی برای افزایش بازده کودهای حاوی فسفر و افزایش عملکرد در خاک‌های اصلاح شده با مواد آلی است (۱۰).

افزودن لئوناردیت به خاک، به عنوان ترکیبی پایدار از مواد آلی و منبع طبیعی اسید هیومیک، از طریق بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، می‌تواند شرایط مناسبی را برای فعالیت ریزجانداران مفید خاکی فراهم کند (۱۳). بخش مهمی از میکرواکولوژی ریزوسفر را جمعیت میکروبی خاک

ریزوسفر تشکیل می‌دهند که نقش مهمی در تجزیه مواد آلی، تشکیل نیتروژن، تبدیل عناصر غذایی خاک و رشد و نمو گیاهان در خاک ریزوسفر دارند که نسبت به تغییرات محیطی بسیار حساس هستند (۱۴). اسید هیومیک با بهینه‌سازی نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، تنظیم pH و افزایش دسترسی به عناصر غذایی، شرایط زیستی خاک را بهبود می‌بخشد. این شرایط موجب تحریک فعالیت میکروبی شده و با کاهش محدودیت تغذیه‌ای در گیاه گلرنگ، ذخیره مواد فتوسنتزی را افزایش داده و با هدایت آن‌ها به سوی دانه، موجب افزایش وزن هزاردانه می‌شود (۱۶، ۱۵).

برای تجزیه مؤثر مواد آلی و چرخه عناصر غذایی، نسبت C/N خاک باید در محدوده قابل قبولی باشد. نسبت مطلوب کربن به نیتروژن ۱۰:۱ تا ۲۵:۱ است. در این بازه نیتروژن کافی برای جمعیت میکروبی عرضه شده و تجزیه مواد آلی و آزادسازی محتوای آن تسهیل می‌شود. در سیستم‌های کشاورزی پایدار، نسبت کربن آلی به نیتروژن خاک نقش مهمی در سلامت و کیفیت خاک با اثر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک از جمله ظرفیت نگهداشت آب خاک، چرخه‌های مواد غذایی، جریان گاز، تهویه و رشد ریشه گیاه دارد (۱۷). یکی از عوامل مؤثر در نسبت C/N خاک، افزودن کودهای آلی به خاک به عنوان منبع کربن آلی و یا استفاده آن‌ها در ترکیب با کودهای شیمیایی است (۱۸).

عملکرد در گیاهان حاصل مجموعه فرایندهای مختلف مؤثر در رشد گیاه است. بررسی این فرایندها و نقش تغذیه‌ای خاک در تولید، در شناخت عوامل و فرایندهای مؤثر بر عملکرد گیاه مهم ارزیابی می‌شود. امروزه به دلیل افزایش اهمیت مسائل زیست محیطی توجه بیشتری به کودهای آلی برای جایگزینی با کودهای شیمیایی شده است. بنابراین جایگزینی

تدریجی کودهای آلی به دلیل ارزانی و مزایای نسبی این کودها و مصرف کودهای ارگانیک بدون نگرانی از اثرات سوء زیست محیطی در اکثر مواقع موجب بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها شده و افزایش تولید و باروری زمین‌های زراعی را به دنبال دارند بنابراین مدیریت کود از عوامل اصلی در نیل به کشاورزی پایدار محسوب می‌گردد. هدف این پژوهش، بررسی امکان کاهش و یا جایگزینی مصرف کودهای فسفردار با لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) بود. برای این منظور کود سوپرفسفات تریپل و لئوناردیت در خاک رسی-لومی تحت کشت گیاه گلرنگ، در تیمارهای ترکیبی و جداگانه استفاده شد و تأثیر این تیمارها بر شاخص‌های جمعیت میکروبی، نسبت C/N و pH خاک به عنوان شاخص‌های مؤثر در شکل‌گیری عملکرد دانه گلرنگ بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در منطقه پرچین (با مختصات جغرافیایی ۳۹ درجه و ۰۸ دقیقه و ۴۷ ثانیه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه و ۶۰ ثانیه طول شرقی)، شهرستان گرمی، و با همکاری دانشگاه تبریز انجام شد. این منطقه تقریباً از نقاط پربارش استان اردبیل بوده و متوسط بارندگی در این منطقه بالای ۵۰۰ میلی‌متر است. آب و هوای مدیترانه‌ای، گرم و نیمه‌خشک با تابستانی گرم و مرطوب و زمستان معتدل و ملایم می‌باشد. عوامل آزمایش شامل لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) و کود سوپرفسفات تریپل بودند. تیمارهای آزمایشی شامل: ۱- شاهد بدون کود (شاهد)، ۲- سوپرفسفات تریپل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (P₁₀₀)، ۳- سوپرفسفات تریپل ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₅₀)، ۴- لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار

شده در جدول ۲ آورده شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای این پژوهش با ۹ تیمار و سه تکرار، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در اواسط اسفند ماه ۱۴۰۰ به مدت یک سال زراعی انجام شد. هر واحد آزمایشی به ابعاد ۲×۲ متر در نظر گرفته شده و فاصله بین ردیف‌ها، ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر با تراکم ۴۰ بوته در مترمربع اجرا گردید. آمادگی بستر کشت با گاوآهن قلمی و به صورت نیمه‌عمیق انجام شد و همه تیمارهای آزمایشی همراه با کاشت به خاک اضافه شدند. همه واحدهای آزمایشی به صورت دیم و بدون آبیاری بودند.

(H₂₀₀)، ۵- لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (H₁₀₀)، ۶- سوپرفسفات تریپل ۵۰ کیلوگرم و لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (P₅₀H₁₀₀)، ۷- سوپرفسفات تریپل ۲۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₂₅H₁₅₀)، ۸- سوپرفسفات تریپل ۷۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₇₅H₅₀) و ۹- سوپرفسفات تریپل ۲۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₂₅H₅₀) بودند. این پژوهش در خاک رسی لومی با مشخصات ارایه شده در جدول ۱ تحت کشت گیاه گلرنگ انجام شد. آنالیز و مشخصات مواد استفاده

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک مزرعه محل انجام آزمایش.

Table 1. Physical and chemical properties of the studied soils.

ماده آلی (%)	رطوبت اشباع (%)	جرم مخصوص ظاهری Soil Bulk Density (BD) (gr/cm ³)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (حالت تر) MWDwet ^۱	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (حالت خشک) MWDdry ^۲	رس (%) Clay	سیلت (%) Silt	شن (%) Sand	بافت خاک Soil texture
2.45	35	1.45	2.5	4.5	27	28	45	لومی-رسی Clay Loam
pH	EC (dS/m)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)
7.1	0.45	0.1	10.1	356	4.4	0.8	0.5	5.3

جدول ۲- خصوصیات کودهای مورد استفاده.

Table 2. Physical and chemical properties of fertilizers applicated in the test.

OM (%)	HA ^۴ (%)	FA ^۳ (%)	Mn (%)	Zn (%)	Fe (%)	K (%)	P (%)	N (%)	pH
49	25	1	0.003	0.01	0.04	0.7	0.3	0.7	6.5
لئوناردیت Leonardite									
-	-	-	-	-	-	-	20	-	-
سوپر فسفات تریپل Superphosphate triple									

- 1- Mean weight diameter wet
- 2- Mean weight diameter dry
- 3- Fulvic Acid
- 4- Humic Acid

اندازه‌گیری برخی خواص فیزیکوشیمیایی خاک: بعد از اتمام کار و برداشت گیاهان نمونه‌هایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری عمق خاک تهیه و صفات موردنظر اندازه‌گیری شدند. در این آزمایش pH خاک با دستگاه pH متر در عصاره گل اشباع خاک قرائت گردید (۱۹). اندازه‌گیری کربن آلی خاک (OC) با روش والکی و بلک اندازه انجام شد (۲۰). مقدار نیتروژن کل با استفاده از روش هضم کج‌لدال به‌دست آمد (۲۱).

اندازه‌گیری جمعیت میکروبی: به‌منظور بررسی جمعیت ریزوسفری و غیر ریزوسفری و تعیین نسبت R/S^1 از روش رقت سریالی و شمارش کلونی استفاده شد (۲۲). برای بررسی جمعیت میکروبی در نواحی ریزوسفری و غیرریزوسفری خاک، نمونه‌برداری در مرحله گل‌دهی گیاه انجام شد. به‌منظور جداسازی خاک ریزوسفری، گیاهان با دقت از خاک خارج شده و خاک چسبیده به ریشه‌ها به‌عنوان نمونه ریزوسفر جمع‌آوری گردید. خاک غیرریزوسفری نیز از فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری از ریشه و از همان عمق برداشت شد. بدین‌منظور، ۱۰ گرم خاک تازه در ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل سوسپانسیون شده و پس از همگن‌سازی، رقت‌های ده‌دهی (تا 10^{-6}) تهیه گردید. از هر رقت، ۰/۱ میلی‌لیتر بر روی محیط نوترینت آگار (Nutrient Agar) به روش پخش سطحی کشت داده شد. پلیت‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد انکوبه‌شده و کلونی‌های تشکیل‌شده شمارش شدند. جمعیت میکروبی به‌صورت واحد تشکیل کلونی در هر گرم خاک خشک ($CFU \cdot g^{-1}$ dry soil) محاسبه گردید.

اندازه‌گیری شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه: از هر واحد آزمایشی در مرحله رسیدگی کامل، پس از حذف حاشیه‌ها بوته‌های یک مترمربع انتخاب و کف‌بر شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. بذره‌ای جدا شده از بوته‌های مربوط به هر کرت آزمایشی به طور جداگانه توزین گردید و عملکرد دانه در واحد سطح تعیین گردید. پس از جدا کردن بذرها، اندام‌های هوایی بوته‌های مربوط به هر واحد آزمایشی، به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و پس از خشک شدن توزین گردیدند و با افزودن وزن عملکرد دانه به آن در نهایت، عملکرد بیولوژیکی گیاه گل‌رنگ که شامل مجموع وزن عملکرد دانه و وزن خشک اندام‌های هوایی (ساقه، برگ، کاپیتول و سایر اجزای غیر بذری) است، تعیین گردید. شاخص برداشت نیز بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید (۲۳).

$$100 \times \frac{\text{عملکرد اقتصادی عملکرد دانه (g)}}{\text{عملکرد بیولوژیکی (g)}} = \text{شاخص برداشت (\%)}$$

تجزیه و تحلیل آماری: نتایج پژوهش پس از آزمون نرمال بودن داده‌ها، به وسیله نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید. همبستگی صفات نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گردید. برای ترسیم شکل‌ها و نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

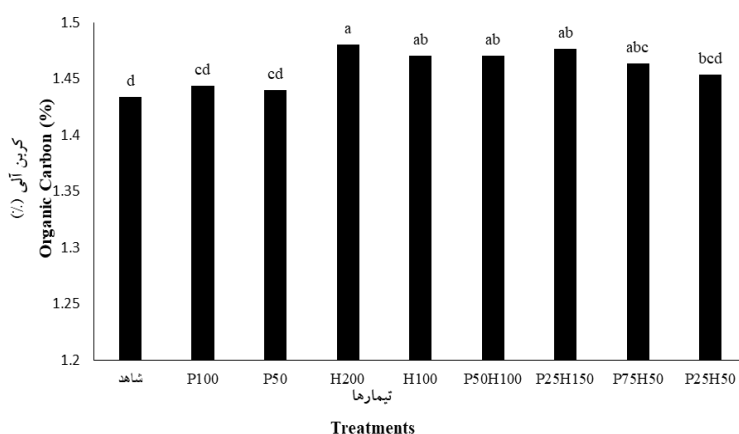
نتایج و بحث

کربن آلی خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثر تیمارهای مختلف بر شاخص کربن آلی خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیش‌ترین کربن آلی خاک

1- Ratio of rhizospheric microbial population to non-rhizospheric microbial population (Rhizosphere/Bulk Soil)

علاوه بر این که لئوناردیت به عنوان منبع ثابت کربن آلی است به نظر می‌رسد لئوناردیت با افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک و فعالیت کاتالیزوری بیوشیمیایی این آنزیم‌ها و افزایش متابولیسم میکروبی در خاک موجب افزایش کربن آلی خاک شده است (۱۳). به نظر می‌رسد افزایش لئوناردیت به عنوان منبع غنی از اسید هیومیک (جدول ۲)، کربن آلی خاک را به خوبی توانسته افزایش دهد و با افزایش لئوناردیت در تیمارها افزایش کربن آلی به وضوح مشخص است. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده هم‌زمان لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و فسفر ۲۵ کیلوگرم در هکتار اثر هم‌افزایی و برهمکنش مثبت داشته و موجب افزایش ماده آلی خاک با افزایش رشد ریشه گیاه و ترشحات آن (به عنوان منبع ماده آلی) شده است. همچنین در تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل، افزایش رشد ریشه گیاهان می‌تواند عامل افزایش کربن آلی در این تیمارها باشد (۲۹).

مورد آزمایش در تیمار H₂₀₀ و کم‌ترین مقدار در تیمار شاهد مشاهده شد. بعد از تیمار H₂₀₀ با ۱/۴۸ درصد کربن آلی (۳/۴ درصد افزایش)، تیمارهای P₂₅H₁₅₀ (۳/۱ درصد افزایش)، P₅₀H₁₀₀ (۲/۶ درصد افزایش) و H₁₀₀ (۲/۶ درصد افزایش) به ترتیب با درصد کربن آلی ۱/۴۷۷، ۱/۴۷۰ و ۱/۴۷۰ درصد، اختلاف معنی‌داری با تیمار H₂₀₀ نداشتند و درصد کربن آلی بالایی داشتند (شکل ۱). کربن آلی خاک از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی کیفیت و سلامت خاک که تضمین‌کننده پایداری اکوسیستم و حاصلخیزی خاک می‌باشد (۲۴ و ۲۵). در اثر تجزیه تدریجی اسید هیومیک، که به عنوان منبع پایدار و تدریجی کربن عمل می‌کند، میزان کربن آلی خاک افزایش یافت (۲۶). اسید هیومیک با افزایش فعالیت‌های آنزیمی موجب افزایش درصد کربن آلی خاک شد (۲۷). افزایش کربن آلی خاک در اثر کاربرد خاکی اسید هیومیک به عنوان یکی از اثرات شناخته‌شده و مورد تأکید در پژوهش‌های علمی مطرح شده است (۲۸).



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های درصد کربن آلی تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 1. Comparison of Organic carbon (%) averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر pH، درصد کربن آلی، نیتروژن، نسبت C/N و شاخص‌های میکروبی خاک.

Table 3. Results of variance analysis of the effect of different treatments on pH, organic carbon, total nitrogen, C/N ratio and microbial indicators of soil.

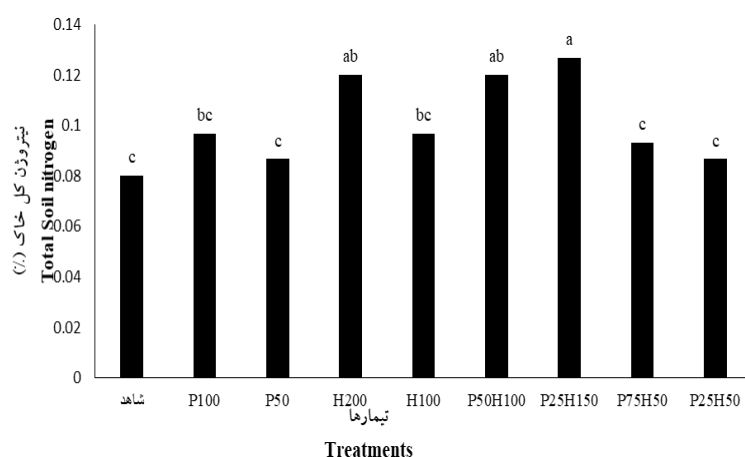
میانگین مربعات MS							درجه آزادی Df	منابع تغییر S.O.V
نسبت جمعیت میکروبی R/S microbial community ratio R/S	جمعیت میکروبی غیرریزوسفری $\times 10^{-4}$ Non-rhizosphere soil microbial community (10^{-4})	جمعیت میکروبی ریزوسفری $\times 10^{-4}$ Rhizosphere soil microbial community (10^{-4})	نسبت کربن به نیتروژن nitrogen to carbon ratio	نیتروژن کل خاک Total soil nitrogen	کربن آلی (%) Organic carbon (%)	خاک pH Soil pH		
0.005 ^{ns}	18.48 ^{ns}	219.7 ^{ns}	3.669 ^{ns}	0.926 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.001 ^{ns}	2	بلوک Block
0.019 ^{**}	1.26 ^{ns}	492.5 ^{**}	16.598 [*]	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	8	تیمار Treatments
0.005	5.73	96.58	5.163	0.009	0.000	0.001	16	خطا Error

*, ** و ^{ns} به ترتیب بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک، پنج و غیرمعنی‌داری

*, ** and ^{ns} indicate significant difference at the probability level of one, five percent and non-significance, respectively

بنابراین، این ویژگی مواد هیومیک ارتباط بسیار نزدیکی با جذب عناصری مانند نیتروژن دارد (۱۲ و ۳۳). از مطالعه دیگری استنباط شد که اعمال اسید هیومیک به همراه کودهای معدنی، محتوی مواد مغذی خاک به خصوص نیتروژن کل خاک را افزایش می‌دهد و باعث جذب بیش‌تر نیتروژن در گیاه می‌شود که در نتیجه، موجب بهبود عملکرد گیاه می‌شود (۳۴). به نظر می‌رسد کاربرد لئوناردیت، به عنوان منبعی غنی از اسیدهای هیومیک، با آزادسازی تدریجی اسیدهای آلی حاصل از تجزیه ساختارهای هیومیکی در خاک و کاهش موضعی pH در ناحیه ریشه (شکل ۳)، موجب کلاته شدن برخی اشکال معدنی نیتروژن، بهبود جذب آن توسط گیاه و کاهش تلفات نیتروژن از طریق شستشو یا تبدیل به فرم‌های غیرقابل جذب شده و در نهایت به افزایش نیتروژن کل خاک منجر شده است (۳۵).

نیتروژن کل خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر تیمارهای مورد استفاده بر عنصر نیتروژن خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد تیمار $P_{25}H_{150}$ با ۰/۱۳ درصد (۶۲/۵ درصد افزایش) بیش‌ترین درصد نیتروژن خاک و تیمارهای شاهد، $P_{25}H_{50}$ و $P_{75}H_{50}$ به ترتیب با ۰/۰۸، ۰/۰۹ و ۰/۰۹ درصد داری کم‌ترین درصدهای نیتروژن خاک بودند (شکل ۲). لئوناردیت به عنوان منبع غنی از اسید هیومیک، با فراهم‌سازی منبع کربن و بهبود شرایط زیستی، موجب افزایش فعالیت متابولیکی ریزجانداران و در نتیجه تسریع معدنی‌شدن نیتروژن آلی در خاک می‌شود (۳۰). کاربرد اسید هیومیک موجب افزایش نیتروژن در دسترس خاک گردید (۳۱). به دلیل داشتن سطوح آبگریز و آبدوست مواد هیومیک، این مواد با ساختارهای فسفولیپیدی غشای سلولی تعامل دارند و به عنوان یک حامل مواد مغذی عمل می‌کنند (۳۲)،



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن کل خاک (%) تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 2. Comparison of Total soil nitrogen (%) averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

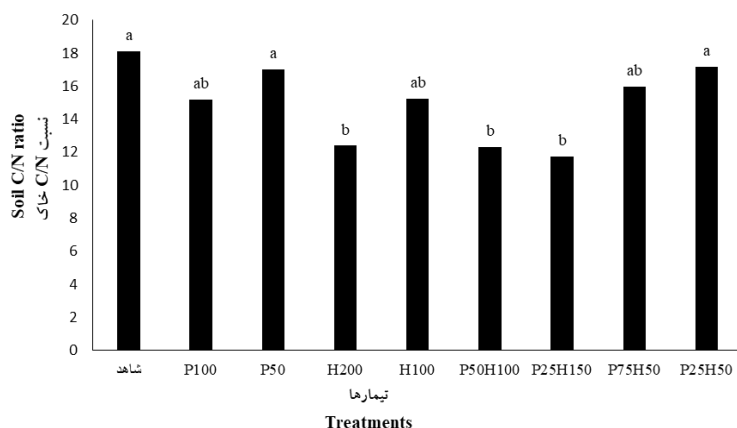
Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

(۳۶). همه تیمارهای پژوهش حاضر بر اساس نتایج پژوهش‌های مختلف، دارای نسبت مطلوب کربن به نیتروژن برای تجزیه مواد آلی و فعالیت جمعیت میکروبی (بین ۱۰:۱ تا ۲۵:۱) بودند (۳۶). تفاسیر مختلفی برای میزان C/N خاک وجود دارد، اما در رابطه با اندازه‌گیری C/N خاک پس از برداشت گیاهان، نسبت نسبتاً پایین C/N خاک نشان می‌دهد که مواد آلی با سرعت مناسبی تجزیه شده و آزادسازی عناصر اتفاق افتاده است (۳۷). در نسبت‌های بالای C/N خاک، ریزموجودات خاکریز نیتروژن خاک را برای تجزیه مواد آلی فراوان مصرف می‌کنند که در نتیجه منجر به کمبود نیتروژن برای گیاهان می‌شود که بازتاب آن در عملکرد منعکس می‌شود (۳۷). در پژوهش دیگری نسبت‌های بالای C/N، به علت وجود نسبت بالای عنصر کربن در خاک، جمعیت میکروبی به‌جای آزاد کردن نیتروژن، آن را به سمت رشد خود منحرف کرد و محدودیت نیتروژن در خاک اتفاق افتاد و کمبود نیتروژن برای گیاه به‌وجود آمد (۱۸). افزودن کودهای آلی به خاک، با کاهش C/N خاک موجب افزایش فعالیت میکروبی و آزادسازی

نسبت C/N خاک: بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارهای مختلف بر نسبت C/N خاک در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، بیش‌ترین نسبت C/N خاک در تیمارهای شاهد، P₅₀ و P₂₅H₅₀ به ترتیب با ۱۷/۱۷، ۱۸/۱۲ و ۱۶/۹۹ مشاهده شد، همچنین تیمارهای P₇₅H₅₀، H₁₀₀ و P₁₀₀ به ترتیب با میزان ۱۵/۹۷، ۱۵/۲۵ و ۱۵/۱۸ از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با این تیمارها نداشتند و دارای نسبت C/N خاک بالایی بودند. کم‌ترین نسبت C/N در تیمارهای P₂₅H₁₅₀، P₅₀H₁₀₀ و H₂₀₀ به ترتیب با ۱۱/۷۲، ۱۲/۳۱ و ۱۲/۳۸ مشاهده شد (شکل ۳). محدوده قابل‌قبول نسبت C/N خاک برای تجزیه مؤثر و چرخه عناصر غذایی ضروری است تا نیتروژن کافی برای جمعیت میکروبی عرضه شده و تجزیه مواد آلی و رهاسازی محتوی آن تسهیل شود (۳۶). حفظ نسبت بهینه کربن به نیتروژن خاک به دلایل مختلف از جمله حفظ جمعیت ریزموجودات مفید خاکریز، افزایش تنفس میکروبی، افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود ساختار خاک بسیار مهم است

تسهیل فرایند معدنی شدن نیتروژن ایفا کرده و در نهایت موجب بهبود حاصلخیزی زیستی خاک و کاهش نسبت C/N خاک شده است (۳۹). در مقابل، افزایش نسبت C/N در تیمارهای سوپر فسفات تریپل (P_{50}) و شاهد، با مقادیر نسبتاً پایین کربن آلی و نیتروژن معدنی همراه بود. این موضوع احتمالاً بیانگر آن است که فرایند معدنی شدن نیتروژن در این تیمارها به طور مؤثری تحریک نشده و افزایش نسبت C/N بیش تر ناشی از کاهش آزادسازی نیتروژن بوده تا تجمع واقعی کربن آلی، که می تواند اثرات منفی بر در دسترسی عناصر غذایی برای گیاه و کارایی زیستی خاک داشته باشد (۴۰، ۴۱). در تیمار ترکیبی $P_{25}H_{50}$ نیز نسبت C/N افزایش یافت و برخلاف انتظار، با مقادیر پایین تر کربن آلی و درصد نیتروژن خاک همراه بود؛ که احتمالاً به دلیل ناکافی بودن سطح لئوناردیت برای تحریک معدنی دار رشد ریشه، فعالیت میکروبی و تجزیه نیتروژن رخ داده است (۴۲).

عناصر می شود و به دلیل رهاسازی تدریجی نیتروژن از مواد آلی، خطر آبشویی آن را کاهش می دهد. چنین سازوکاری می تواند یکی از دلایل کاهش C/N خاک در تیمارهای $P_{25}H_{150}$ ، $P_{50}H_{100}$ و H_{200} در اثر استفاده لئوناردیت باشد (۳۸). لازم به ذکر است که این تیمارها دارای بالاترین میزان کربن آلی (شکل ۱) و نیتروژن کل خاک (شکل ۲) نسبت به دیگر تیمارها بودند. نسبت C/N همبستگی منفی بالایی با نیتروژن کل خاک داشت ($r = -0.98$ ، $P < 0.01$) (جدول ۶). در تیمارهای حاوی لئوناردیت، به ویژه در سطح مصرف بالای آن (H_{200}) و نیز تیمار ترکیبی $P_{25}H_{150}$ ، کاهش معنی دار نسبت C/N خاک مشاهده شد. این کاهش با افزایش هم زمان درصد کربن آلی و درصد نیتروژن خاک همراه بود که نشان دهنده ورود کربن آلی پایدار از لئوناردیت به عنوان منبع هیومیکی و تحریک فرایند معدنی شدن نیتروژن است. به نظر می رسد فعالیت میکروبی افزایش یافته در تیمارهای حاوی لئوناردیت (H_{200} و $P_{25}H_{150}$)، نقش مؤثری در



شکل ۳- مقایسه میانگین های نسبت کربن به نیتروژن خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 3. Comparison of soil nitrogen to carbon ratio averages under the influence of different treatments.

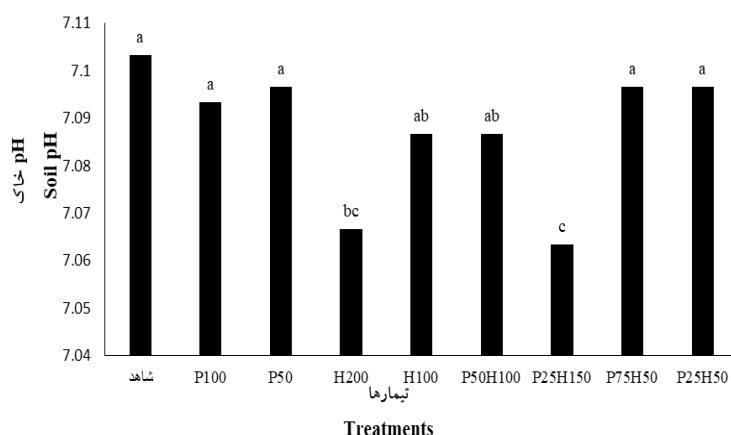
تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

pH و اسیدی شدن خاک شد که در نهایت کاهش نسبت C/N خاک را به دنبال داشت (۴۳). این یافته از نظر کاربرد مواد آلی و کاهش نسبت کربن به نیتروژن با نتایج پژوهش حاضر هم‌راستا است.

pH خاک: براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مورد پژوهش، تأثیر تیمارهای مختلف بر pH خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیش‌ترین مقدار pH خاک در تیمارهای شاهد، P_{100} و P_{50} ، $P_{75}H_{50}$ ، $P_{25}H_{50}$ و P_{100} به ترتیب با مقدار pH ۷/۰۹۳، ۷/۰۹۷، ۷/۱۰۰، ۷/۱۰۳ و ۷/۰۶۳ کم‌ترین مقدار pH در تیمار $P_{25}H_{150}$ با ۷/۰۶۳ مشاهده شد. تیمار H_{200} بعد از تیمار $P_{25}H_{150}$ با ۷/۰۶۷ دارای مقدار pH کم‌تری بود (شکل ۴).

نسبت C/N خاک همبستگی منفی و معنی‌داری با جمعیت میکروبی ریزوسفری و همبستگی مثبت و معنی‌دار با pH خاک داشت (جدول ۵)، به نظر می‌رسد استفاده هم‌زمان لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و فسفر ۲۵ کیلوگرم در هکتار اثر تجمعی داشته و کاربرد لئوناردیت موجب آزاد شدن اسیدهای آلی و کاهش موضعی pH خاک شده (شکل ۴)، که این فرایند در تجزیه تدریجی نیتروژن خاک و کاهش نسبت C/N خاک می‌تواند مؤثر باشد. چرا که کاهش pH در خاک‌های قلیایی باعث بهبود فعالیت میکروبی و ایجاد تعادل در نسبت کربن به نیتروژن می‌شود (۳۷). در مطالعه دیگری، استفاده از کود سبز مانند شبدر سفید و گاودانه موجب تسریع در تجزیه ماده آلی و آزادسازی نیتروژن گردید. در این فرایند، آزاد شدن اسیدهای آلی مانند کربنیک اسید باعث کاهش



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های pH خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 4. Comparison of Soil pH averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

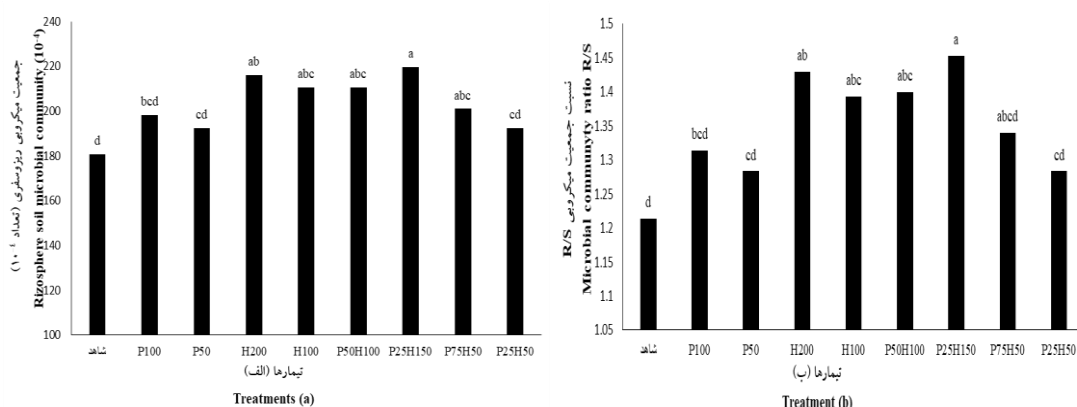
کرده و به همراه توانایی تبادل کاتیونی، باعث کاهش pH خاک شود. علاوه بر این، اسید هیومیک با تحریک فعالیت میکروبی و افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک، آزادسازی اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک و مالیک را تسهیل می‌کند؛ این اسیدهای آلی نیز با کمپلکس‌سازی فلزات و افزایش اسیدیته موضعی،

pH خاک تأثیر به‌سزایی بر دسترسی مواد مغذی دارد. لئوناردیت با داشتن میزان زیادی گروه‌های اسید ضعیف در ساختمان مولکولی خود، می‌تواند pH خاک‌های قلیایی را اصلاح کند (۴۴). لئوناردیت به‌عنوان منبع غنی از اسید هیومیک، با گروه‌های عاملی فنولی و کربوکسیلیک خود می‌تواند یون‌های H^+ آزاد

نسبت جمعیت میکروبی ریزوسفری بر غیرریزوسفری (R/S) در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود. جمعیت میکروبی غیرریزوسفری معنی دار نشد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیش‌ترین تعداد جمعیت میکروبی ریزوسفری با $P_{50}H_{100}$ $219/7 \times 10^{-4} \cdot \text{CFU} \times \text{g}^{-1}$ (خاک) در تیمار $P_{50}H_{100}$ و کم‌ترین تعداد آن در تیمار شاهد با $180/7 \times 10^{-4} \cdot \text{CFU} \times \text{g}^{-1}$ (خاک) بود. تیمارهای $P_{25}H_{50}$ و P_{50} با تعداد $192/3 \times 10^{-4} \cdot \text{CFU} \times \text{g}^{-1}$ (خاک) جمعیت میکروبی ریزوسفری اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند و تعداد کم‌تر جمعیت میکروبی ریزوسفری را داشتند (شکل ۵). بیش‌ترین نسبت جمعیت میکروبی ریزوسفری بر غیرریزوسفری (R/S) در تیمار $P_{25}H_{150}$ با $1/45$ و H_{200} با $1/43$ $10^{-4} \cdot \text{CFU} \times \text{g}^{-1}$ (خاک) بود. تیمار $P_{25}H_{150}$ معنی‌داری با تیمار $P_{25}H_{150}$ نداشت و دارای نسبت R/S بالایی بود. کم‌ترین آن در تیمار شاهد با $1/21$ بود. تیمارهای $P_{25}H_{50}$ و P_{50} نیز اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند و کم‌ترین میزان نسبت R/S را با $1/28$ $10^{-4} \cdot \text{CFU} \times \text{g}^{-1}$ (خاک) داشتند (شکل ۵).

قابلیت دسترسی عناصر غذایی را در خاک ارتقا می‌دهند و در نتیجه عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشند (۴۵ و ۴۶). باتوجه به این‌که خاصیت بافری خاک مانع از بروز تغییرات شدید در pH خاک می‌شود و این تغییرات معمولاً به تدریج و در طول زمان رخ می‌دهند، کاهش اندک ولی معنی‌دار pH خاک در اثر کاربرد لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) می‌تواند باعث اسیدی‌شدن نسبی ناحیه ریزوسفر شده و در نتیجه فعالیت میکروبی، انحلال مواد آلی، و فراهمی عناصر غذایی را به‌طور موضعی افزایش دهد (۴۷). این پارامتر همبستگی منفی و معنی‌داری با کربن آلی و نیتروژن کل خاک داشت (جدول ۵). به نظر می‌رسد استفاده هم‌زمان لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و فسفر ۲۵ کیلوگرم در هکتار اثر تجمعی داشته و کاربرد لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) با تجزیه مواد آلی ناشی از اسید هیومیک در خاک موجب آزاد شدن اسیدهای آلی و کاهش pH خاک شده است.

جمعیت میکروبی خاک: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارهای مختلف بر جمعیت میکروبی ریزوسفری در سطح احتمال ۱ درصد و



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های الف: جمعیت میکروبی ریزوسفری ب: نسبت میکروبی R/S، تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 5. Comparison of a) Rizosphere soil microbial community b) microbial community ratio R/S averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

احتمالاً دلیل معنی‌دار نشدن جمعیت میکروبی غیرریزوسفری به این جهت است که لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) نمی‌تواند به عنوان تغذیه و منبع تامین انرژی برای باکتری‌های غیرریزوسفری باشد، در نتیجه باعث افزایش جمعیت باکتریایی غیرریزوسفری نشده است (۴۸). اسید هیومیک 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 ریزوسفری 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 (۴۹). در مطالعه دیگری پس از افزودن لئوناردیت، فراوانی باکتری‌های *Firmicutes* و قارچ‌های *Basidiomycota* و *Mortierellomycota* افزایش یافت که برای رشد و عملکرد گیاه مؤثر گزارش شده است. علاوه بر این، استفاده از کودهای با ماهیت اسیدی به جای کودهای قلیایی، محیط میکروارگانیسم‌های اصلی خاک را تغییر داد که منجر به افزایش فراوانی اکتینومیست‌ها در خاک شد (۵۰). با کاربرد کودهای شیمیایی فعالیت جمعیت میکروبی برای مثال جمعیت اکتینومیست‌های خاک کاهش یافت که ممکن است تا حدی ناشی از کاربرد کود شیمیایی باشد (۵۳). در پژوهش حاضر جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S همبستگی منفی با pH خاک نشان داد (جدول ۵). باکتری‌های خاک معمولاً در بازه pH بین ۶ تا ۷/۵ بیش‌ترین فعالیت را نشان می‌دهند، در حالی‌که قارچ‌ها در شرایط اسیدی‌تر نیز قادر به حفظ فعالیت خود هستند (۵۱). در این مطالعه از لئوناردیت با pH حدود ۶/۵ استفاده شد که می‌تواند از طریق کاهش نسبی pH در ناحیه ریزوسفری، منجر به ایجاد تغییرات موضعی در ویژگی‌های شیمیایی خاک اطراف ریشه گردد. محیط ریزوسفر به دلیل مجاورت مستقیم با ترشحات ریشه،

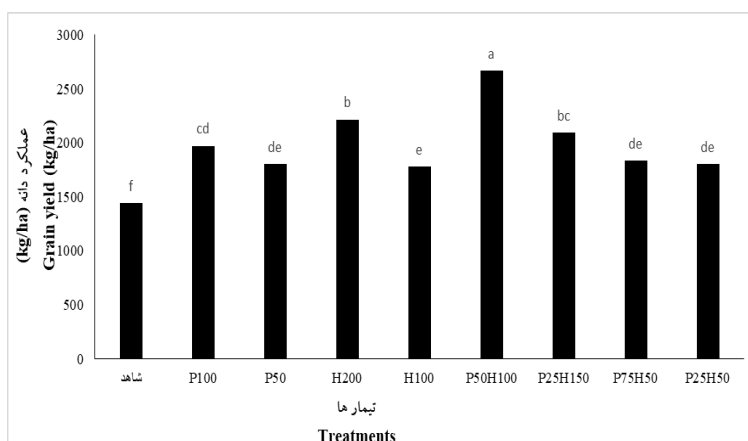
محل تجمع بالاتری از اسیدهای آلی و تبادلات یونی است، و همین تغییرات موضعی pH می‌تواند منجر به تحریک جمعیت میکروبی در این ناحیه شود. این تغییرات، به‌ویژه در مقیاس ریزوسفری، قادر است شرایط زیستی مطلوب‌تری را برای رشد و فعالیت برخی میکروارگانیسم‌های مفید، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌های وابسته به سیستم ریشه فراهم نماید (۱۳، ۳۹). در مطالعه زو و همکاران (۲۰۲۴) کاربرد اسید هیومیک ضمن کاهش pH خاک، موجب افزایش فعالیت میکروبی و بهبود ویژگی‌های زیستی خاک از طریق ارتقاء جمعیت باکتری‌ها و قارچ‌های خاک‌زی شد (۵۲). اسید هیومیک به‌دلیل ساختار آروماتیک و پایداری نسبی در برابر تجزیه زیستی، با القای ریشه‌زایی جانبی و توسعه ریشه‌های موئین، می‌تواند شرایط مناسبی برای افزایش چسبندگی، بقا و تراکم میکروارگانیسم‌ها در سطح ریشه فراهم کند (۴۸).

به‌نظر می‌رسد کاربرد لئوناردیت خام به‌عنوان منبع طبیعی اسید هیومیک، با ایجاد کاهش نسبی pH در ناحیه ریزوسفری و تحریک فعالیت‌های آنزیمی، شرایط مناسبی برای رشد و افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک فراهم کرده است (۱۳). همبستگی مثبت بین جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S با کربن آلی وجود داشت، این پارامترها نیز همبستگی منفی با نسبت C/N خاک داشتند. اسید هیومیک با افزایش در دسترس بودن انرژی مورد نیاز میکروارگانیسم‌های خاک از طریق افزایش کربن آلی، باعث افزایش فعالیت میکروبی خاک شد (۴۸).

عملکرد دانه: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد تیمار $H_{100} P_{50}$ با $2666/7$ کیلوگرم بر هکتار (۸۵ درصد افزایش)، بیش‌ترین و در تیمار شاهد با $1441/7$ کیلوگرم بر هکتار کم‌ترین عملکرد دانه مشاهده شد (شکل ۶). اسید هیومیک موجب جذب و

(۵۸). استفاده کود سوپر فسفات تریپل به همراه اسید هیومیک باعث فراهم نمودن زمینه مناسب جهت دریافت انرژی و افزایش بازده فتوسنتزی و به دنبال آن افزایش تعداد طبق، تعداد دانه در طبق و در نهایت عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه در گیاه گلرنگ شد (۵۹). استفاده از اسید هیومیک به طور مؤثری موجب افزایش حلالیت فسفر و جذب آن در گیاه ذرت می شود (۶۰). به نظر می رسد که استفاده هم زمان لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) و کود فسفر در تیمار $P_{50} H_{100}$ اثر هم افزایی داشته و موجب افزایش جذب فسفر و سایر عناصر غذایی و افزایش توان فتوسنتزی شده و از این طریق بر عملکرد دانه اثر داشته است.

تسهیل انحلال فسفر، نیتروژن و سایر عناصر غذایی در خاک می شود که اثر مثبتی بر اجزای عملکرد و در نهایت عملکرد دانه طبق نظر پژوهشگران داشته است (۵۴ و ۵۵). در پژوهش دیگری، بر روی گیاه گلرنگ، کاربرد اسید هیومیک موجب افزایش ۱۶ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. این افزایش عملکرد به افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه در تیمارهای حاوی اسید هیومیک نسبت داده شد (۵۵). طبق برخی یافته ها، اثر مثبت کود فسفر در عملکرد و اجزای عملکرد گیاه از طریق تأثیر بر فرایندهای سوخت و ساز و فتوسنتز بیان شده است (۵۷ و ۹). در مطالعه دیگری کود فسفر موجب افزایش عملکرد دانه از طریق افزایش رشد ریشه و به تبع آن افزایش جذب مواد غذایی و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی شد.



شکل ۶- مقایسه میانگین های عملکرد دانه تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 6. Comparison of Grain yield averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

دانه و نسبت C/N خاک وجود داشت ($r = -0.59$)، اسید هیومیک با افزایش نیتروژن خاک باعث افزایش متابولیسم ریزجانداران خاک می شود که بهبود وضعیت فیزیکی و حاصلخیزی خاک را موجب شده است که اثر آن در افزایش رشد و عملکرد گیاه منعکس می شود (۳۰).

عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی دار با جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S میکروبی داشت ($r = 0.54$, $P < 0.01$ و $r = 0.52$, $P < 0.01$). همچنین این صفت همبستگی مثبت و معنی دار با نیتروژن و کربن آلی خاک داشت ($r = 0.53$, $P < 0.01$ و $r = 0.52$, $P < 0.01$). همبستگی منفی بین عملکرد

کاهش نسبت کربن به نیتروژن در نتیجه بهبود فرآیند معدنی شدن نیتروژن، افزایش فعالیت های میکروبی و آزادسازی تدریجی ترکیبات نیتروژن دار در خاک بوده است که با تأمین یکنواخت تر نیتروژن در طول دوره رشد، به ویژه در مراحل رشد رویشی، موجب بهبود رشد و افزایش عملکرد گیاه شده است (۱۸، ۳۹).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت.

Table 4. Results of variance analysis of the effect of different treatments on grain yield, biological yield and harvest index.

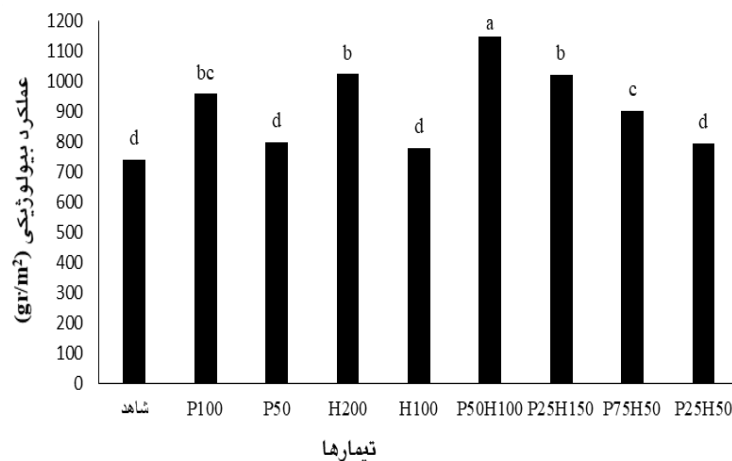
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	شاخص برداشت
S.O.V	Df	MS	Harvest index
عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی	عملکرد بیولوژیکی	Biological yield
Grain yield	Grain yield	Grain yield	Grain yield
2	4758.3 ^{ns}	4211.673 ^{ns}	2.388 ^{ns}
8	355704.2 ^{**}	58133.4 ^{**}	2.561 [*]
16	8401.04	2630.6	0.690
Block			
Treatments			
Error			

^{*}، ^{**} و ^{ns} به ترتیب بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک، پنج و غیرمعنی داری

*, ** and ^{ns} indicate significant difference at the probability level of one, five percent and non-significance, respectively

عملکرد بیولوژیکی: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس داده ها، اثر تیمارها بر عملکرد بیولوژیکی گلرنگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده ها نشان داد بیشترین عملکرد بیولوژیکی در تیمار $P_{50} H_{100}$ با ۱۱۴۷ گرم بر مترمربع (۵۵ درصد افزایش) و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد با ۷۴۱ گرم بر مترمربع مشاهده شد. اختلاف معنی داری بین تیمارهای شاهد، H_{100} ، $P_{25}H_{50}$ و P_{50} مشاهده نشد (شکل ۷). فرجامی و نبوی کلات (۲۰۱۳) در بررسی اثرات متقابل اسید هیومیک و فسفر دریافتند که به احتمال زیاد لئوناردیت از طریق کمک به فرآیند ریشه زایی موجب افزایش جذب عناصری مانند نیتروژن و فسفر شده است که منجر به افزایش فتوسنتز و به دنبال آن افزایش تولید ماده خشک و عملکرد بیولوژیکی شده است (۶۱). در پژوهش دیگری دلیل افزایش عملکرد بیولوژیکی، اثر محرک فسفر و اسید هیومیک بر رشد گیاه توسط جذب عناصر غذایی، افزایش فعالیت های

آنزیمی، تغییرات نفوذپذیری در غشاء و سنتز پروتئین بیان شده است (۵۶). هیومیک اسید استخراجی از منابع آلی در مقایسه با سایر تیمارها نقش مؤثرتری در افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک و افزایش رشد گیاه ذرت داشت (۶۲). همبستگی منفی بین عملکرد بیولوژیکی با نسبت C/N و pH خاک مشاهده شد ($r = -0.67$ ، $P < 0.01$ و $r = -0.46$ ، $P < 0.05$). این صفت همبستگی مثبت با جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S میکروبی داشت ($r = 0.58$ ، $P < 0.01$ و $r = 0.59$ ، $P < 0.01$). همچنین عملکرد بیولوژیکی همبستگی مثبت و قوی با عملکرد دانه داشت ($r = 0.89$ ، $P < 0.01$) (جدول ۴). همبستگی بین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی نیز به اثبات رسیده است (۶۳). به نظر می رسد استفاده همزمان لئوناردیت و کود فسفر در تیمار $P_{50} H_{100}$ باعث کاهش pH خاک و افزایش جذب عناصر غذایی شده و با فراهمی بستر مناسب برای موجودات مفید خاکزی موجب افزایش عملکرد بیولوژیکی شده است.



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های عملکرد بیولوژیکی تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

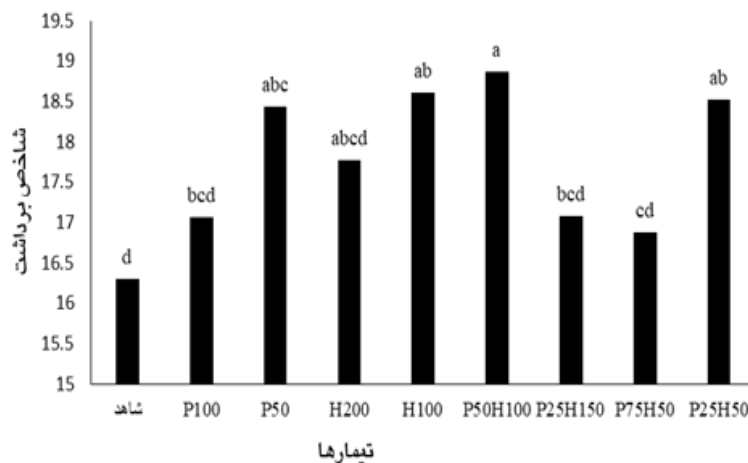
Figure 7. Comparison of biological yield averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

شد (شکل ۸). هم‌چنین عملکرد دانه همبستگی مثبت با شاخص برداشت داشت ($r=0/40$, $P<0/01$) (جدول ۵). در پژوهش مهدی‌پور و همکاران (۲۰۲۴) همبستگی بین عملکرد دانه و شاخص برداشت به اثبات رسیده است (۶۴).

شاخص برداشت: نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که شاخص برداشت در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیش‌ترین شاخص برداشت در تیمار $P_{50} H_{100}$ با ۱۸/۹ (۱۶ درصد افزایش) و کم‌ترین شاخص برداشت در تیمار شاهد با ۱۶/۳ مشاهده



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های شاخص برداشت تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Figure 8. Comparison of harvest index averages under the influence of different treatments.

تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

موردتوجه قرار گیرند. تیمار P_{50} (مصرف ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار) با هزینه ۱۶۹۰۰۰۰۰۰ تومان، از نظر اقتصادی در سطح متوسطی قرار دارد، اما به دلیل اتکای کامل به کود شیمیایی و نداشتن ترکیب آلی، از منظر پایداری زیست محیطی قابل توصیه نیست.

نکته قابل توجه آن است که همه تیمارهای مورد بررسی، از نظر عملکرد تفاوت معنی داری با تیمار شاهد نشان دادند. بنابراین، حتی در شرایطی که کشاورزان به لحاظ اقتصادی امکان تأمین ترکیبات پرهزینه را نداشته باشند، استفاده از تیمارهای کم هزینه و دوست دار محیط زیست مانند H_{100} (هزینه: ۵۰۰۰۰۰۰ تومان) می تواند جایگزین مناسبی برای بهبود عملکرد نسبت به حالت بدون مصرف کود (شاهد) باشد.

ارزیابی شاخص های سلامت خاک: نتایج این پژوهش نشان داد که مصرف لئوناردیت تأثیر مثبتی بر شاخص های سلامت خاک داشت. شاخص هایی نظیر کربن آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، فعالیت میکروبی و pH خاک به عنوان شاخص های کلیدی سلامت زیستی و شیمیایی خاک ارزیابی شدند (۶۵، ۶۶). استفاده از لئوناردیت، به ویژه در تیمار H_{200} منجر به افزایش معنی دار کربن آلی و نیتروژن کل خاک شد (شکل های ۱ و ۲). این امر به ارتقاء کیفیت خاک، بهبود ساختار و افزایش توان نگهداری رطوبت منجر می شود که از مهم ترین عوامل پایداری اکوسیستم های زراعی محسوب می گردد (۶۷، ۲۴). همچنین، کاهش نسبت C/N در تیمارهای حاوی لئوناردیت، به ویژه H_{200} و $P_{25}H_{150}$ (شکل ۳)، نشان دهنده افزایش تجزیه ماده آلی و معدنی شدن نیتروژن بوده است. این وضعیت می تواند کارایی جذب نیتروژن توسط گیاه را افزایش داده و بهبود عملکرد را به دنبال داشته باشد (۶۶). از سوی دیگر،

ارزیابی اقتصادی تحقیق: در این پژوهش، هزینه تأمین نهاده های مصرفی شامل لئوناردیت و سوپرفسفات تریپل برای تیمارهای مختلف در واحد سطح (یک هکتار) مورد ارزیابی قرار گرفت. قیمت هر کیلوگرم لئوناردیت برابر با ۵۰۰۰ تومان و قیمت سوپرفسفات تریپل به صورت غیریارانه ای برابر با ۳۸۰۰۰ تومان لحاظ گردید. نتایج محاسبات نشان داد که تیمارها از نظر هزینه مصرفی تفاوت قابل توجهی دارند. تیمار H_{200} (۲۰۰ کیلوگرم لئوناردیت) با مجموع هزینه ۱۶۰۰۰۰۰۰۰ تومان کم هزینه ترین گزینه مؤثر بوده و از نظر زیست محیطی نیز به عنوان یک منبع کاملاً طبیعی، دارای مزیت قابل توجهی است. از سوی دیگر، تیمار $P_{50}H_{100}$ با ترکیب ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم لئوناردیت، هزینه ای برابر با ۲۰۴۰۰۰۰۰۰ تومان داشت که نسبت به عملکرد به دست آمده، گزینه ای متعادل و منطقی ارزیابی می شود. تیمار $P_{25}H_{150}$ نیز با هزینه ۲۰۶۷۵۰۰۰۰ تومان، به دلیل سهم بالای لئوناردیت و مقدار نسبتاً پایین تر سوپرفسفات، نه تنها از نظر اقتصادی در سطح متوسط قرار دارد، بلکه از لحاظ زیست محیطی نیز پس از تیمار H_{200} ، یکی از ترکیب های مطلوب محسوب می شود. این تیمار می تواند گزینه ای سازگار با محیط زیست و هم زمان با عملکرد مناسب مورد توجه قرار گیرد. در طرف مقابل، تیمار P_{100} با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل، هزینه ای معادل ۳۰۸۰۰۰۰۰۰ تومان داشت و به عنوان پرهزینه ترین تیمار شناخته شد. تیمار $P_{75}H_{50}$ نیز با هزینه ۳۰۲۷۵۰۰۰۰ تومان در گروه تیمارهای با هزینه بالا قرار گرفت. تیمارهایی نظیر H_{100} (هزینه: ۵۰۰۰۰۰۰۰ تومان) و $P_{25}H_{50}$ (هزینه: ۱۰۷۲۵۰۰۰۰ تومان) نیز اگرچه دارای هزینه های پایین تری هستند، اما به طور نسبی عملکرد مطلوبی ارائه دادند و در شرایط اقتصادی محدود می توانند

جمعیت میکروبی ریزوسفری در تیمارهای H_{200} و $P_{25}H_{150}$ افزایش یافته که گواهی بر تحریک فرآیندهای زیستی و فعال‌سازی زیست‌توده خاک در اثر مصرف ماده آلی فعال است. نکته قابل‌توجه آن است که کاربرد لئوناردیت باعث کاهش جزئی در pH خاک گردید. این تغییر، اگرچه در دامنه مناسبی باقی ماند، اما با اسیدی شدن ملایم ناحیه ریزوسفری همراه شد که نقش مثبتی در تحریک فعالیت میکروبی و دسترسی بهتر به برخی عناصر غذایی ایفا می‌کند. هم‌چنین، بررسی همبستگی‌ها نشان داد که عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری با کربن آلی، نیتروژن کل و جمعیت میکروبی خاک داشت و در مقابل، با نسبت C/N همبستگی منفی نشان داد (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که ارتقاء سلامت خاک، عاملی کلیدی در افزایش عملکرد گیاه می‌باشد. در مجموع، تیمار H_{200} بیش‌ترین تأثیر مثبت را بر شاخص‌های زیستی و شیمیایی خاک داشت و تیمار $P_{25}H_{150}$ نیز به‌عنوان گزینه‌ای متعادل و پایدار، عملکرد مناسبی از خود نشان داد. یافته‌ها بیانگر آن است که کاربرد لئوناردیت، به‌ویژه در قالب ترکیب‌های آلی‌محور یا همراه با مقادیر محدود کودهای فسفردار، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در بهبود سلامت و پایداری خاک در نظام‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) و فسفر بهبود یافت. تعیین نسبت مناسب مصرف اسید هیومیک و کود فسفر، اثر قابل‌توجهی بر رشد رویشی و عملکرد دانه گلرنگ، به‌ویژه در شرایط دیم، دارد. همه تیمارهای مورد استفاده در پژوهش حاضر از لحاظ عملکرد دانه اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشتند. نتایج حاصل از بررسی و مقایسه میانگین صفات خاکی و عملکردی گیاه گلرنگ و ضریب همبستگی بین صفات نشان داد در مجموع بر اساس شاخص‌های اندازه‌گیری شده به لحاظ عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی، تیمار $P_{50} H_{100}$ بهترین عملکرد را داشت مصرف ۲۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل با ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار لئوناردیت و یا مصرف مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار لئوناردیت می‌تواند با کاهش pH و نسبت C/N خاک، خاک را از لحاظ کربن آلی و نیتروژن کل بهبود دهد و حد مناسبی از جمعیت میکروبی را برای خاک فراهم کند. با در نظر گرفتن توأم جنبه‌های افزایش محصول، مسائل اقتصادی و سلامت خاک، به ترتیب کاربرد تیمارهای $P_{25}H_{150}$ ، H_{200} و $P_{50} H_{100}$ در کشت گلرنگ می‌تواند مناسب باشد. نتایج نشان داد لئوناردیت با افزایش قابلیت جذب می‌تواند موجب کاهش مصرف کود سوپرفسفات تریپل شود.

سپاسگزاری

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

نتیجه‌گیری کلی

خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاکی مورد اندازه‌گیری و صفات عملکردی گلرنگ با کاربرد

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین صفات اندازه گیری شده.

Table 5. Correlation coefficients between measured traits.

شاخص برداشت (۱۰) Harvest index (10)	عملکرد بیولوژیکی (۹) Biological yield (9)	عملکرد دانه (۸) Grain yield (8)	نسبت R/S (۷) R/S ratio (7)	جمعیت میکروبی غیر ریزوسفری (۶) Non-rizosphere microbial community (10 ⁻⁴) (6)	جمعیت میکروبی ریزوسفری (۵) Rizosphere microbial community (10 ⁻⁴) (5)	پH خاک (۴) Soil pH (4)	نسبت C/N (۳) Soil C/N ratio (3)	نیتروژن کل خاک (۲) Total soil nitrogen (2)	کربن آلی (۱) Organic carbon (1)	
								1	1	
								1	0.511**	2
							1	-0.975*	-0.408*	3
						1	0.443*	-0.513**	-0.501**	4
					1	-0.491**	-0.549**	0.616**	0.697**	5
				1	0.245 ^{ns}	-0.313 ^{ns}	0.239 ^{ns}	-0.137 ^{ns}	0.354**	6
			1	0.045 ^{ns}	-0.979**	-0.429*	-0.610**	0.661**	0.645**	7
		1	0.521**	0.148 ^{ns}	0.535**	-0.391*	-0.590**	0.656**	0.583**	8
	1	0.889**	0.588**	0.024 ^{ns}	0.577**	-0.459*	-0.668**	0.730**	0.470*	9
1	-0.060 ^{ns}	0.401*	0.024 ^{ns}	0.332 ^{ns}	0.085 ^{ns}	0.014 ^{ns}	0.034 ^{ns}	-0.007 ^{ns}	0.364 ^{ns}	10

*, ** و ^{ns} به ترتیب بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک، پنج و غیر معنی داری

*, ** and ^{ns} indicate significant difference at the probability level of one, five percent and non-significance, respectively

منابع

- Zhou, L., Yan, Y., Wang, Y., Wu, Q., Yan, J., & Pei, J. (2022). Research progresses and prospects of medicated oil dual-purpose crop safflower based on patent mining. *Oil Crop Science*, 7 (4), 209-218. doi:10.1016/j.ocsci.2022.10.001.
- Emongor, V. E., & Emongor, R. A. (2023). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Neglected and Underutilized Crops*, 683-731. doi:10.1016/b978-0-323-90537-4.00024-7.3.
- Sharrifmoghaddasi, M., & Omiditabrizi A. H. (2010). Stability Analysis of Seven Iranian Winter Safflower Cultivars. *World Applied Sciences Journal*, 8 (11), 1366-1369.
- Zeynali, A. (1999). Safflower (identification, production and consumption). *Publications of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 144p. [In Persian]
- Anonymous. (2022). Agricultural statistics yearbook (Crop year 2022-2023). Ministry of Agriculture Jihad, Deputy for Planning, Economy, Statistics and Information Technology. [In Persian]
- Lopes, A. S. (1996). Soils under Cerrado: a Success Story in Soil management In. *International Fertilizer Industry Association*, 10 (2), 1-10.

7. Hopkins, B., & Ellsworth, J. (2003). Phosphorus nutrition on potato production. *Idaho Potato Conference*, 22-23.
8. 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*, 0301-4797. doi:10.1016/j.jenvman.2022.116038.
9. Ahmadpour Abnavi, S., Ramroudi M., & Galavi, M. (2019). Effect of biological and chemical phosphorus fertilizer on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under low irrigation condition. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 29 (1), 269-284. [In Persian]
10. 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. doi:10.1016/j.chemgeo.2021.120099.
11. 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. doi:10.1016/j.jenvman.2022.116553.
12. Chen, Y., Clapp, C. E., & Magen, H. (2004). Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: The role of organo-iron complexes. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50 (7), 1089-1095. doi:10.1080/00380768.2004.10408579.
13. Li, Y., Fang, F., Wei, J., Wu, X., Cui, R., Li, G., Zheng, F., & Tan, D. (2019). Humic acid fertilizer improved soil properties and soil microbial diversity of continuous cropping peanut: A three-year experiment. *Scientific Reports*, 9 (1), 12014. doi:10.1038/s41598-019-48620-4.
14. Cheng, J., Jin, H., Zhang, J., Xu, Z., Yang, X., Liu, H., Xu, X., Min, D., Lu, D., & Qin, B. (2022). Effects of allelochemicals, soil enzyme activities, and environmental factors on rhizosphere soil microbial community of *Stellera chamaejasme* L. along a growth-coverage gradient. *Microorganisms*, 10 (1), 158. doi:10.3390/microorganisms10010158.
15. Khoram Ghahfarokhi, A., Rahimi, A., Torabi, B., & Maddah Hosseini, S. H. (2018). Effects of Soil Application of Humic Acid and Foliar Applications on Yield, Yield Component and Oil Content of Safflower (*Carthamus Tinctorius* L.). *Journal of Crop Production*, 11 (1), 37-39. https://doi.org/10.22069/ejcp.2018.10186.1796. [In Persian]
16. Lumactud, R. A., Gorim, L. Y., & Thilakarathna, M. (2022). Impacts of Humic-Based Products on the Microbial Community Structure and Functions toward Sustainable Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6 (22), 977121. doi:10.3389/fsufs.2022.977121.16.
17. Wan, X., Huang, Z., He, Z., Yu, Z., Wang, M., Davis, M. R., & Yang, Y. (2014). Soil C:N ratio is the major determinant of soil microbial community structure in subtropical coniferous and broadleaf forest plantations. *Plant and Soil*, 387 (1-2), 103-116. doi:10.1007/s11104-014-2277-4.
18. Laleh, S., Jami, Al-Ahmadi, S., & Parsa, S. (2018). Changes in Soil C/N Ratio and Response of Growth of Hemp (*Cannabis sativa* L.) to Different Levels of Animal Manure and Chemical Fertilizers. *Iranian journal of field crops research*, 16 (1), 137-152. doi:10.22067/gsc.v16i1.60300.
19. Sparks, D. L. (2009). American Society Of Agronomy, & Al, E. Methods of soil analysis. Part 3 Chemical methods. *Madison Soil Science Society of America American Society of Agronomy*.

20. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). *Chromic acid titration for determination of soil organic matter. Soil Science*, 63, 251.
21. Ryan, J., Estefan, G., & Rashid, A. (2001). *Soil and Plant Analysis Laboratory Manual*. Second Edition. Available from ICARDA, Aleppo, Syria, 172p.
22. Ben-David, A., & Davidson, C. E. (2014). Estimation method for serial dilution experiments. *Journal of Microbiological Methods*, 107, 214-221. **doi:10.1016/j.mimet.2014.08.023.**
23. Maghferati Nayeibi, R. (2015). *Evaluation of some physiological and agronomic traits of safflower (Carthamus tinctorius L.) in reaction to nitrogen fertilizer and lack of water*. Senior thesis. Tabriz University. Tabriz, Iran. [In Persian]
24. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1-22.
25. Marchetti, A., Piccini, C., Francaviglia, R., & Mabit L. (2012). Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy. *Pedosphere*, 22, 230-242.
26. Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant Biostimulants: A Categorical Review, Their Implications for Row Crop Production, and Relation to Soil Health Indicators. *Agronomy*, 11 (7), 1297. **doi:10.3390/agronomy11071297.**
27. Ahmed, A. G., Orabi, S. A., & Gaballah, M. S. (2010). Effect of Bio-NP fertilizer on the growth, yeild and some biochemicalsl component of two sunflower cultivars. *International Journal of Academic Research*, 2, 4.
28. Song, J., Zhang, H., Chang, F., Yu, R., Zhang, X., Wang, X., Wang, W., Liu, J., Zhou, J., & Li, Y. (2023). Humic Acid plus Manure Increases the Soil Carbon Pool by Inhibiting Salinity and Alleviating the Microbial Resource Limitation in Saline Soils. *CATENA*, 233, 107527. **doi:10.1016/j.catena.2023.107527.**
29. 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. **doi:10.3390/agronomy11112267.**
30. Harper, S. M., Kerven, G. L., Edwards, D. G., & Ostatek-Boczynski, Z. (2000). Characterisation of fulvic and humic acids from leaves of Eucalyptus camaldulensis and from decomposed hay. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (10), 1331-1336.
31. Khosravi, S., Nezami, S., & Fatemi, A. (2023). Effect of humic acids extracted from organic sources on available forms of nitrogen, phosphorus, and potassium in a calcareous soil. *Soil Management and Sustainable Production*, 13 (3), 25-43. **doi:10.22069/ejsms.2023.20545.2072.** [In Persian]
32. Selladurai, R., & Purakayastha, T. J. (2016). Effect of humic acid multinutrient fertilizers on yield and nutrient use efficiency of potato. *Journal of Plant Nutrition*, 3 (7), 949-56. **doi: 10.1080/01904167.2015.1109106.**
33. Pettit, R. E. (2004). Organic matter, humus, humate, humic acid, fulvic acid and humin: their importance in soil fertility and plant health.
34. Xiong, Q., Wang, S., Lu, X., Xu, Y., Zhang, L., Chen, X., Xu, G., Tian, D., Zhang, L., Jing, J., & 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), 1581-1581. **doi:10.3390/agronomy13061581.**
35. Muscolo, A., Sidari, M., & Nardi, S. (2013). Humic substance: Relationship between structure and activity. Deeper information suggests univocal findings. *Journal of Geochemical Exploration*, 129, 57-63. **doi:10.1016/j.gexplo.2012.10.012.**

36. Gawol, D., Nichvolodoff, T., & Floyd, D. (2022). Carbon to nitrogen ratios influence microbial diversity in the soil of interior Douglas-fir forests in British Columbia. *Journal of Experimental Microbiology and Immunology*, 17, 1-12. doi:10.14288/ujemi.v27.
37. Kharrazi, M., Unesi, H., & Abedini, J. (2014). Effect of corn waste blended with cow dung and paper on vermicompost qualities using *Eisenia fetida*. *Applied Field Crops Research*, 27 (22), 179-191. doi:10.22092/aj.2014.101219. [In Persian]
38. Abdi, S., Tajbakhsh, M., Abdollahi, Mandoulakani, B., & Rasouli, M. H. (2015). The effect of different green manures on availability of phosphorus, total nitrogen and organic carbon content. *Applied Field Crops Research*, 28(107), 48-57. doi:10.22092/aj.2015.105685. [In Persian]
39. Stevenson, F. J., & Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. J. Wiley.
40. Chen, Y., De Nobili M., & Aviad T. (2004). *Stimulatory Effects of Humic Substances on Plant Growth*. doi:10.1201/9780203496374.ch4.
41. Paul, E. A. (2007). Soil microbiology, ecology, and biochemistry in perspective. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, 3-24. doi:10.1016/b978-0-08-047514-1.50005-6.
42. Creamer, C. A., de Menezes, A. B., Krull, E. S., Sanderman, J., Newton-Walters, R., & Farrell, M. (2015). Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, 175-188. doi:10.1016/j.soilbio.2014.10.008.
43. Koocheki, A., Gholami, A., Mahdavi Damghani, A., & Tabrizi, L. (2005). *Organic field crop*. Ferdowsi of mashhad publisher. 331. [In Persian]
44. Meng, F., Huang, Q., Cai, Y., Yuan, G., Xiao, L., & Han, F. X. (2022). Effect of humic acid derived from leonardite on the redistribution of uranium fractions in soil. *Peer Journal*, 10. doi:10.7717/peerj.14162.
45. Rupiasih, N. N. (2005). A review: Compositions, structures, properties and applications of humic substances. *Journal of Advanced Science and Technology*, 8, 16-25.
46. Zhao, K., Yang, Y., Peng, H., Zhang, L., Zhou, Y., Zhang, J., & Luo, L. (2022). Silicon fertilizers, humic acid and their impact on physicochemical properties, availability and distribution of heavy metals in soil and soil aggregates. *Science of the Total Environment*, 822, 153483. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153483.
47. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15-27. doi:10.1016/j.scienta.2015.09.013.
48. 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. doi:10.1186/s40538-017-0112-x.
49. 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. doi:10.3389/fmicb.2019.02271.
50. Wolny-Koładka, K., Marcińska-Mazur, L., Jarosz, R., Juda, M., Lošák, T., & Mierzwa-Hersztek, M. (2022). Effect of Soil Application of Zeolite-Carbon Composite, Leonardite and Lignite on the Microorganisms. *Ecological Chemistry and Engineering*, 29 (4), 553-563. <https://doi.org/10.2478/eces-2022-0040>.
51. Rousk, J., Brookes, P. C., & Baath, E. (2009). Contrasting Soil pH Effects on Fungal and Bacterial Growth Suggest Functional Redundancy in Carbon

- Mineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(6), 1589-1596. <https://doi.org/10.1128/aem.02775-08>.
52. 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>.
 53. Rajapaksha, R. M. C. P., Wijekoon, U. K., & Yasanayake, P. H. (2009). Soil microbial populations as affected by intensive cultivation of exotic vegetables in Nuwaraeliya and rice in Bathalagoda. *Journal of Agricultural Science*, 46, 1-14.
 54. 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. doi:10.1016/j.apsoil.2022.104587.
 55. EL-Sayed S. A. A., Hellal, F. A., & Mohamed, K. A. S. (2014). Effect of Humic acid and phosphate sources on nutrient composition and yield of Radish grown in calcareous soil. *Plant Nutrition Department, National Research Centre*, 179p.
 56. 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.
 57. Kaleem, S., Ansar, M., Ali, M. A., Sher, A., Ahmad, G., & Rashid, M. (2009). Effect of Phosphorus on the Yield and Yield Components of Wheat Variety "Inqlab-91" Under Rainfed Conditions. *Sarhad Journal of Agriculture*, 25, 1989-1992.
 58. Jalilian, J., & Heydarzadeh, S. (2015). The effect of cover plants, organic and chemical fertilizers on the qualitative and qualitative characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25 (4), 71-85. [In Persian]
 59. Abedi, M., Shafagh, 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. <https://doi.org/10.22034/saps.2023.55579.3007>. [In Persian]
 60. Khalili, N., Ghorbani Nasrabadi, R., Barani Motlagh, M., & Khodadadi, R. (2023). The effect of humic acid and inoculation of actinomycete isolates on phosphorus solubility under laboratory conditions and phosphorus content of maize (*Zea mays*). *Soil Management and Sustainable Production*, 13 (2), 75-94. <https://doi.org/10.22069/ejsms.2023.21253.2096>. [In Persian]
 61. Fargami, A. A., & Nabavi Kalat, S. M. (2013). The role of humic acid and phosphorus on the quality and quantity of spring wheat (*Calendula officinalis* L.). *Ecophysiology of Crop Plants (Agriculture Sciences)*, 28 (4), 443-452. [In Persian]
 62. Hosseini, S., Hejazi Mehrizi, M., Sarcheshmeh Pour, M., & Fekri, M. (2024). Comparing the effect of manure-extracted humic acid and commercial humic acid on the growth of maize and inorganic P forms in a calcareous soil, *Soil Management and Sustainable Production*, 13 (4), 115-132. doi: 10.22069/ejsms.2024.21366.2101. [In Persian]
 63. Aslam, M., Khalid Aziz, & Muhammad Ali. (1998). Relationship of Some Morpho-physiological Traits with Grain Yield in Maize. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2 (1), 244-246. <https://doi.org/10.3923/pjbs.1999.244.246.51>.
 64. Mehdipour, H., Kamkar, B., Abbasi, R., & Siahmarguee, A. (2024). Crop Yield and Growth Trait Response to Varied

- Nitrogen Fertilization and Pre-Planting of Cover Crops in Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34 (2), 259-279. **doi:10.22034/SAPS.2024.59926.3169.**
[In Persian]
65. Doran, J. W., & Parkin, T. B. (2015). Defining and Assessing Soil Quality. *SSSA Special Publications*, 35, 1-21. **doi:10.2136/sssaspecpub35.c1.**
66. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, 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. **doi:10.1016/j.soilbio.2018.01.030.**
67. Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review.