



(OPEN ACCESS)

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

Mehsa Abedi¹, Jalil Shafagh Kolvanqh^{*2}, Arash Hemati³1-PhD student in Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: mahsaabedi@tabrizu.ac.ir2-Corresponding Author, Prof. of the Dept. of Plant Ecophysiology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: shafagh.jalil@gmail.com3-CEO of Qizil Topraq Sahand Company, Maragheh, Iran. E-mail: hemati.arash@yahoo.com**Article Info****Article type:**

Full Length Research Paper

Article history:

Received:

Revised:

Accepted:

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 different levels and combinations of leonardite (a rich source of humic acid) and triple superphosphate on the yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). The ultimate goal was to reduce or replace the use of phosphorus fertilizers with leonardite to promote sustainable agriculture, reduce input costs, and enhance crop productivity.

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 yield of safflower and both rhizosphere microbial population and microbial R/S ratio. Conversely, grain and biological yield were negatively and significantly 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 and thereby reduce the need for triple superphosphate fertilizer. For achieving optimal safflower yield while preserving soil health and supporting sustainable production, integrated treatments of leonardite with triple superphosphate—particularly P25H150 and P50H100—are recommended.

Cite this article: Abedi, Mehssa, Shafagh Kolvanqh, Jalil, Hemati, Arash. 2025. 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*, 15 (2), ----.



© The Author(s).

DOI: -----

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



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

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

- ۱- دانشجوی دکتری آگروتکنولوژی، 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- مدیرعامل شرکت قیزیل توپراق سهند، مراغه، ایران. رایانامه: hemati.arash@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳</p> <p>تاریخ ویرایش: [REDACTED]</p> <p>تاریخ پذیرش: [REDACTED]</p>	<p>سابقه و هدف: از نکات کلیدی بهبود مدیریت زراعی، ارزیابی فرایندهای تشکیل عملکرد و سیستم تغذیه گیاه است. میزان ماده‌ی آلی خاک، فعالیت موجودات خاکزی و میزان دسترسی به عناصر خاک از عوامل تأثیرگذار در عملکرد گیاه محسوب می‌شوند. این تحقیق 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.</p>
<p>واژه‌های کلیدی: اسید هیومیک، عملکرد دانه، فسفر، گلرنگ، نسبت C/N</p>	<p>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 منطقه‌ی پرچین استان اردبیل با ۹ تیمار: شاهد، سوپرفسفات تریپل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (P₁₀₀)، سوپرفسفات تریپل ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₅₀)، لئوناردیت ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (H₂₀₀)، لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (H₁₀₀)، سوپرفسفات تریپل ۵۰ کیلوگرم و لئوناردیت ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (P₅₀H₁₀₀)، سوپرفسفات تریپل ۲۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₂₅H₁₅₀)، سوپرفسفات تریپل ۷۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₇₅H₅₀) و سوپرفسفات تریپل ۲۵ کیلوگرم و لئوناردیت ۵۰ کیلوگرم در هکتار (P₂₅H₅₀) 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</p>

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 P₅₀H₁₀₀ 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 تحقیق، تیمارهای H₂₀₀ و P₂₅H₁₅₀ در صفات خاکی و تیمارهای P₅₀H₁₀₀، P₂₅H₁₅₀ 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 P₅₀H₁₀₀ مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: عابدی، مهسا، شفق کلوانق، جلیل، همتی، آرش (۱۴۰۴). سنتز سبز و مشخصه‌یابی کود نانو کربن دات آهن و مطالعه انکوباسیونی آن در یک خاک آهکی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۲)، ---

DOI: -----



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گلرنگ گیاه علفی یک ساله با نام علمی *Carthamus tinctorius L.* از تیره آستراسه (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 ۳۳۵،۱۱ 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 به صورت 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 قابل ملاحظه‌ای 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 اجزای 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 غیر قابل جذب تبدیل می‌شود (۱۰). به دلیل غیر قابل 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 فولویک، اسید هیومیک و هومین هستند (۱۲). اسید هیومیک (مشتق شده 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).

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. لذا 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 لذا مدیریت کود از عوامل اصلی در نیل به کشاورزی پایدار محسوب می‌گردد. هدف این تحقیق، 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 شاخص های مؤثر در شکل‌گیری عملکرد دانه گلرنگ بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق 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

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 خاک‌زی 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 هزار دانه می‌شود (۱۵، ۱۶).

برای تجزیه مؤثر مواد آلی و چرخه عناصر غذایی، نسبت C/N خاک باید در محدوده قابل قبولی باشد. نسبت مطلوب کربن به نیتروژن ۱:۱۰ تا ۱:۲۵ 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).

خاک رسی لومی با مشخصات ارایه شده در جدول ۱ تحت کشت گیاه گلرنگ انجام شد. آنالیز و مشخصات مواد استفاده شده در جدول ۲ آورده شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای این تحقیق 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 متر مربع اجرا گردید. آمادگی بستر کشت با گاوآهن قلمی و به صورت نیمه عمیق انجام شد و کلیه تیمارهای آزمایشی همراه با کاشت به خاک اضافه شدند. کلیه واحدهای آزمایشی به صورت دیم و بدون آبیاری بودند.

لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) و کود سوپر فسفات 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 (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

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 ¹	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (حالت خشک) MWDdry ²	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
Organic Matter (%)	Saturated Water Content (%)		(حالت تر)	(حالت خشک)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	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 applied in the test.

OM (%)	HA ³ (%)	FA ⁴ (%)	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									

¹ Mean weight diameter wet

² Mean weight diameter dry

³ Fulvic Acid

⁴ Humic Acid

سانتی‌گراد انکوبه شده و کلونی‌های تشکیل شده شمارش شدند. جمعیت میکروبی به صورت واحد تشکیل کلونی در هر گرم خاک خشک ($\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ dry soil) محاسبه گردید.

اندازه‌گیری شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه: از هر واحد آزمایشی در مرحله‌ی رسیدگی کامل، پس از حذف حاشیه‌ها بوته‌های یک متر مربع انتخاب و کف‌بر شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. بذرها 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 فرمول زیر محاسبه گردید (۲۳).

اندازه‌گیری برخی خواص فیزیکوشیمیایی

خاک: بعد از اتمام کار و برداشت گیاهان نمونه‌هایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری عمق خاک تهیه و صفات مورد نظر 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 بدست آمد (۲۱).

اندازه‌گیری جمعیت میکروبی: به منظور 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 غیر ریزوسفری خاک، نمونه‌برداری در مرحله گل‌دهی گیاه انجام شد. به منظور جداسازی خاک ریزوسفری، گیاهان با دقت از خاک خارج شده و خاک چسبیده به ریشه‌ها به عنوان نمونه ریزوسفر جمع‌آوری گردید. خاک غیر ریزوسفری نیز از فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری از ریشه و از همان عمق برداشت شد. بدین منظور، ۱۰ گرم خاک تازه در ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل سوسپانسیون شده و پس از همگن‌سازی، رقت‌های ده‌دهی (تا 10^{-4}) 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

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

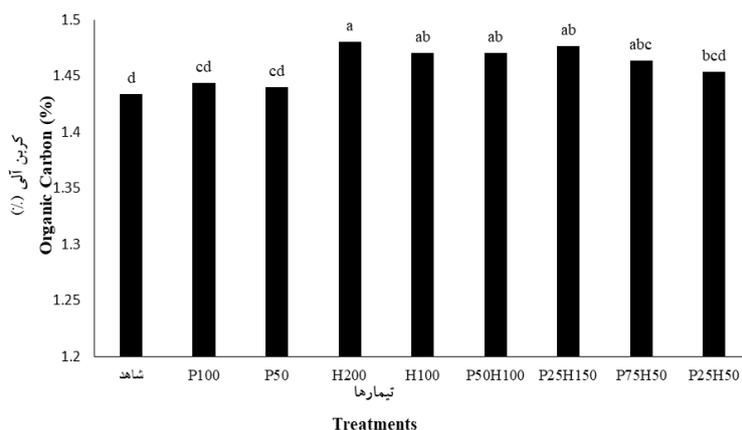
$$\text{عملکرد اقتصادی (g)} = \frac{\text{عملکرد دانه (g)}}{\text{عملکرد بیولوژیکی (g)}} \times 100 = \text{شاخص برداشت (\%)}$$

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 حاکی اسید هیومیک به عنوان یکی از اثرات شناخته‌شده و مورد تأکید در پژوهش‌های علمی مطرح شده است (۲۸). علاوه بر اینکه 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).

تجزیه و تحلیل آماری: نتایج تحقیق پس از آزمون نرمال بودن داده‌ها، به وسیله نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای 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). بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیشترین کربن آلی خاک 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



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

Fig. 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								
نسبت جمعیت میکروبی R/S microbial community ratio R/S	جمعیت میکروبی غیر ریزوسفری $\times 10^{-4}$ 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 (%)	pH خاک Soil pH	درجه آزادی Df	منابع تغییر S.O.V
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 غیر معنی‌داری

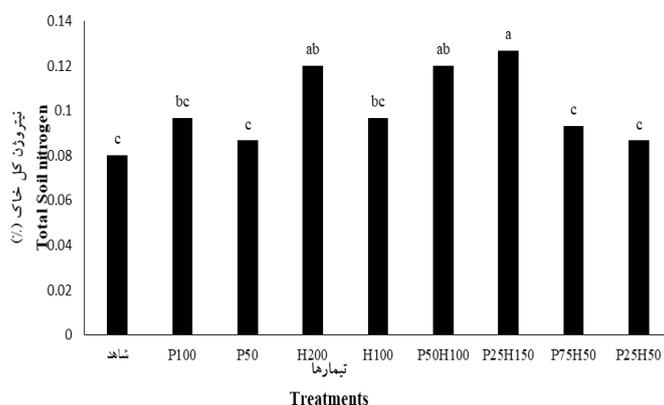
*, ** and ^{ns} and ns indicate significant difference at the probability level of one, five percent and non-significance, respectively

(جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد تیمار P₂₅H₁₅₀ با ۰/۱۳ درصد (۶۲/۵ درصد افزایش) بیشترین درصد نیتروژن خاک و تیمارهای

نیتروژن کل خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر تیمارهای مورد استفاده بر عنصر نیتروژن خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود

استنباط شد که اعمال اسید هیومیک به همراه کودهای معدنی، محتوی مواد مغذی خاک خصوصاً 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، به‌عنوان 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).

شاهد، $P_{75}H_{50}$ و $P_{25}H_{50}$ 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). بدلیل 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)، بنابراین، این ویژگی مواد هیومیک ارتباط بسیار نزدیکی با جذب عناصری مانند نیتروژن دارد (۱۲ و ۳۳). از مطالعه‌ی دیگری



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

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

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

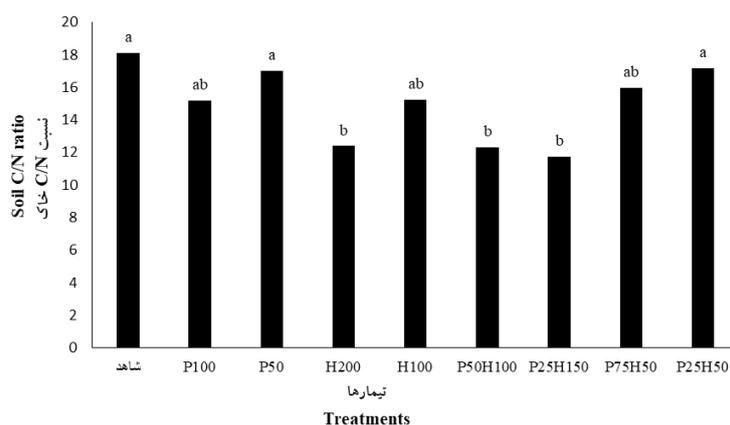
Treatments with at least one common letter were not significantly different (Duncan 5%).

مشاهده شد، همچنین تیمارهای P_{100} و H_{100} ، $P_{75}H_{50}$ 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 $P_{25}H_{150}$ ، $P_{50}H_{100}$ و H_{200} به ترتیب با ۱۱/۷۲، ۱۲/۳۱ و ۱۲/۳۸ مشاهده شد (شکل

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، P_{50} و $P_{25}H_{50}$ به ترتیب با ۱۸/۱۲، ۱۷/۱۷ و ۱۶/۹۹

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 هم‌زمان درصد کربن آلی و درصد نیتروژن خاک همراه بود که نشان‌دهنده ورود کربن آلی پایدار از لئوناردیت به عنوان منبع هیومیکی و تحریک فرآیند معدنی شدن نیتروژن است. به نظر می‌رسد فعالیت میکروبی افزایش یافته در تیمارهای حاوی لئوناردیت (H_{200} و $P_{25}H_{150}$)، نقش موثری در تسهیل فرآیند 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 نسبتا پایین کربن آلی و نیتروژن معدنی همراه بود. این موضوع احتمالا بیانگر آن است که فرآیند معدنی شدن نیتروژن در این تیمارها به‌طور مؤثری تحریک نشده و افزایش نسبت C/N بیشتر ناشی از کاهش آزادسازی نیتروژن بوده تا تجمع واقعی کربن آلی، که می‌تواند 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 پایین‌تر کربن آلی و درصد نیتروژن خاک همراه بود؛ که احتمالا به دلیل ناکافی بودن سطح لئوناردیت برای تحریک معنی‌دار رشد ریشه، فعالیت میکروبی و تجزیه نیتروژن رخ داده است (۴۲).

۳. محدوده‌ی قابل قبول نسبت C/N خاک برای تجزیه‌ی موثر و چرخه‌ی عناصر غذایی ضروری است تا نیتروژن کافی برای جمعیت میکروبی عرضه شده و تجزیه‌ی 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 خاکزی، افزایش تنفس میکروبی، افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود ساختار خاک بسیار مهم است (۳۶). همه‌ی تیمارهای تحقیق 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 نسبتا 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 خاکزی 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 تحقیق 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 بوجود آمد (۱۸). افزودن کودهای آلی به خاک، با کاهش C/N خاک موجب افزایش فعالیت میکروبی و آزادسازی عناصر می‌شود و به دلیل رهاسازی تدریجی نیتروژن از مواد آلی، خطر آبشویی آن را کاهش می‌دهد. چنین سازوکاری می‌تواند یکی از دلایل کاهش C/N خاک در تیمارهای $P_{25}H_{150}$ ، $P_{50}H_{100}$ و H_{200} در اثر استفاده‌ی



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

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

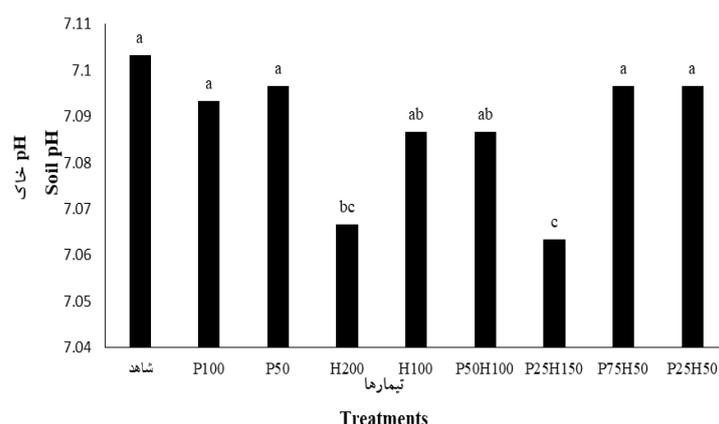
تیمارهای دارای حداقل حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (دانکن ۵٪).

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

نسبت C/N خاک را به دنبال داشت (۴۳). این یافته از نظر کاربرد مواد آلی و کاهش نسبت کربن به نیتروژن با نتایج تحقیق 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، P₂₅H₅₀، P₇₅H₅₀، P₅₀ و P₁₀₀ به ترتیب با مقدار pH ۷/۱۰۳، ۷/۱۰۰، ۷/۰۹۷، ۷/۰۹۷ و ۷/۰۹۳ مشاهده شد. کمترین مقدار pH در تیمار P₂₅H₁₅₀ با ۷/۰۶۳ مشاهده شد. تیمار H₂₀₀ بعد از تیمار P₂₅H₁₅₀ 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 موثر باشد. چرا که کاهش pH در خاک‌های قلیایی باعث بهبود فعالیت میکروبی و ایجاد تعادل در نسبت کربن به نیتروژن می‌شود (۳۷). در مطالعه‌ی 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 نظیر کربنیک اسید باعث کاهش pH و اسیدی شدن خاک شد که در نهایت کاهش



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

Fig. 3. 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%).

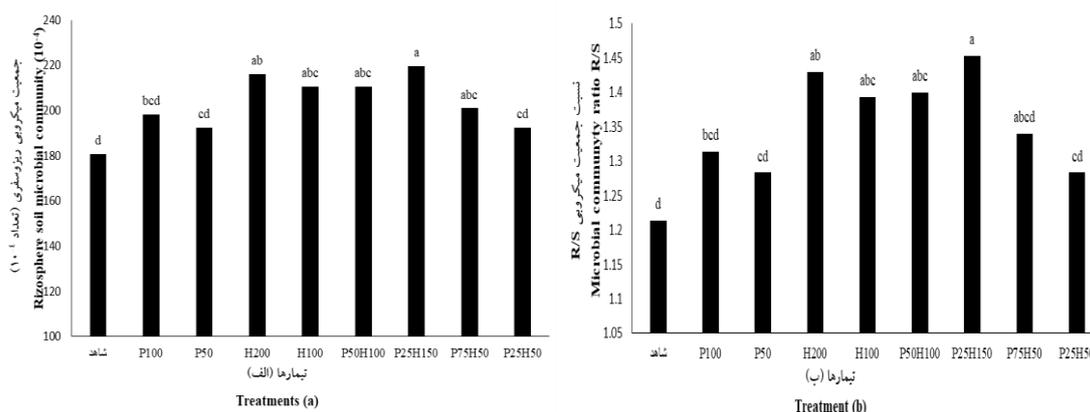
فراهمی عناصر غذایی را به‌طور موضعی افزایش دهد (۴۷). این پارامتر همبستگی منفی و معنی‌داری با کربن آلی و نیتروژن کل خاک داشت (جدول ۵). به نظر می‌رسد استفاده همزمان لئوناردیت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و فسفر ۲۵ کیلوگرم در هکتار اثر تجمعی داشته و کاربرد لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) با تجزیه مواد آلی ناشی 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 نسبت جمعیت میکروبی ریزوسفری بر غیر ریزوسفری (R/S) در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. جمعیت میکروبی غیر ریزوسفری معنی‌دار نشد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین تعداد جمعیت میکروبی ریزوسفری با ۲۱۹/۷ CFU × 10⁻⁴.g⁻¹ خاک) در تیمار P₅₀H₁₀₀ و کمترین تعداد آن در تیمار شاهد با ۱۸۰/۷ CFU × 10⁻⁴.g⁻¹ خاک) بود. تیمارهای P₅₀ و P₂₅H₅₀

pH خاک تأثیر بسزایی 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 به عنوان منبع غنی از اسید هیومیک، با گروه‌های عاملی فنولی و کربوکسیلیک خود می‌تواند یون‌های H⁺ آزاد 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، قابلیت دسترسی عناصر غذایی را در خاک ارتقا می‌دهند و در نتیجه عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشند (۴۵ و ۴۶). با توجه 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

اختلاف معنی داری با تیمار P₂₅H₁₅₀ نداشت و دارای نسبت R/S بالایی بود. کمترین آن در تیمار شاهد با ۱/۲۱ بود. تیمارهای P₂₅H₅₀ و P₅₀ نیز اختلاف معنی داری با تیمار شاهد نداشتند و کمترین میزان نسبت R/S را با ۱/۲۸ ($CFU \times 10^{-4}.g^{-1}$ خاک) داشتند (شکل ۵).

تعداد ۱۹۲/۳ ($CFU \times 10^{-4}.g^{-1}$ خاک) جمعیت میکروبی ریزوسفری اختلاف معنی داری با تیمار شاهد نداشتند و تعداد کمتر جمعیت میکروبی ریزوسفری را داشتند (شکل ۵). بیشترین نسبت جمعیت میکروبی ریزوسفری بر غیر ریزوسفری (R/S) در تیمار P₂₅H₁₅₀ با ۱/۴۵ ($CFU \times 10^{-4}.g^{-1}$ خاک) بود. تیمار H₂₀₀ با ۱/۴۳ ($CFU \times 10^{-4}.g^{-1}$ خاک)



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

Fig. 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 معنی داری نداشتند (دانکن ۵٪).

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

مطالعه‌ی دیگری پس از افزودن لئوناردیت، فراوانی باکتری‌های *Firmicutes* و قارچ‌های *Mortierellomycota* و *Basidiomycota* 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 اکتینومیسیت‌ها در خاک شد (۵۰). با کاربرد کودهای شیمیایی فعالیت جمعیت میکروبی برای مثال جمعیت اکتینومیسیت‌های خاک کاهش یافت که ممکن است تا حدی ناشی از کاربرد کود شیمیایی باشد (۵۳). در تحقیق حاضر جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S همبستگی منفی

احتمالاً دلیل معنی دار نشدن جمعیت میکروبی غیر ریزوسفری به این جهت است که لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) نمی‌تواند به عنوان تغذیه و منبع تامین انرژی برای باکتری‌های غیر ریزوسفری باشد، در نتیجه باعث افزایش جمعیت باکتریایی غیر ریزوسفری 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

(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

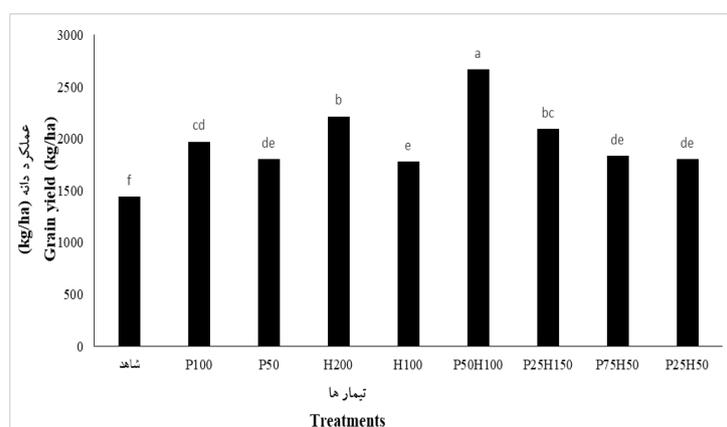
داده‌ها عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد معنی-دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد تیمار P₅₀ H₁₀₀ با ۲۶۶۶/۷ کیلوگرم بر هکتار (۸۵ درصد افزایش)، بیشترین و در تیمار شاهد با ۱۴۴۱/۷ کیلوگرم بر هکتار کمترین عملکرد دانه مشاهده شد (شکل ۶). اسید هیومیک موجب جذب و تسهیل انحلال فسفر، نیتروژن و سایر عناصر غذایی در خاک می‌شود 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 یافته‌ها، 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 مطالعه‌ی دیگری کود فسفر موجب افزایش عملکرد دانه از طریق افزایش رشد ریشه و به تبع آن افزایش جذب

با pH خاک نشان داد (جدول ۵). باکتری‌های خاک معمولاً در بازه pH بین ۶ تا ۷٫۵ بیشترین فعالیت را نشان می‌دهند، در حالی که 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 مطالعه‌ی 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 به دلیل ساختار آروماتیک و پایداری نسبی در برابر تجزیه زیستی، با القای ریشه‌زایی جانبی و توسعه ریشه‌های موین، 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

گیاه ذرت می‌شود (۶۰). به نظر می‌رسد که استفاده همزمان لئوناردیت (منبع غنی از اسید هیومیک) و کود فسفر در تیمار P₅₀ H₁₀₀ اثر هم‌افزایی 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.

مواد غذایی و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی شد (۵۸). استفاده کود سوپرفسفات 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 به‌طور مؤثری موجب افزایش حلالیت فسفر و جذب آن در



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه تحت تأثیر تیمارهای مختلف.

Fig. 6. Comparison of Grain 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%).

وضعیت فیزیکی و حاصلخیزی خاک را موجب شده است که اثر آن در افزایش رشد و عملکرد گیاه منعکس می‌شود (۳۰). کاهش نسبت کربن به نیتروژن در نتیجه بهبود فرآیند معدنی‌شدن نیتروژن، افزایش فعالیت‌های میکروبی و آزادسازی تدریجی ترکیبات نیتروژن‌دار در خاک بوده است که با تأمین یکنواخت‌تر نیتروژن در طول دوره رشد، به ویژه در مراحل رشد رویشی، موجب بهبود رشد و افزایش عملکرد گیاه شده است (۱۸، ۳۹).

عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار با جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S میکروبی داشت (r = ۰/۵۴، P < ۰/۰۱، r = ۰/۵۲)، همچنین این صفت همبستگی مثبت و معنی‌دار با نیتروژن و کربن آلی خاک داشت (r = ۰/۵۳، P < ۰/۰۱، r = ۰/۵۲، P < ۰/۰۱). همبستگی منفی بین عملکرد دانه و نسبت C/N خاک وجود داشت (r = -۰/۵۹، P < ۰/۰۱) (جدول ۵). اسید هیومیک با افزایش نیتروژن خاک باعث افزایش متابولیسم ریزجانداران خاک می‌شود که بهبود

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.

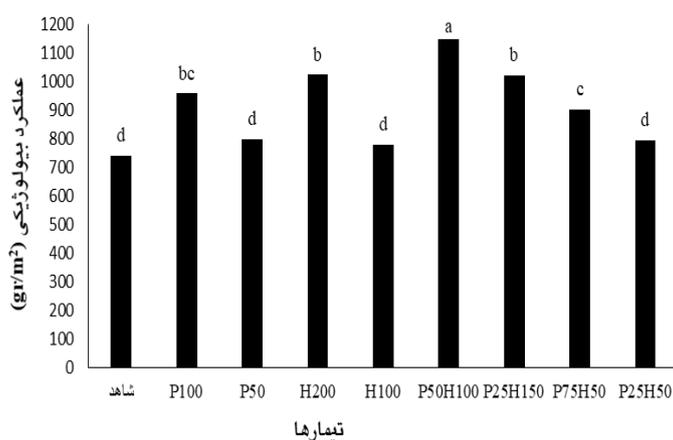
شاخص برداشت harvest index	میانگین مربعات		درجه آزادی Df	منابع تغییر S.O.V
	عملکرد بیولوژیکی biological yield	عملکرد دانه Grain yield		
2.388 ^{ns}	4211.673 ^{ns}	4758.3 ^{ns}	2	بلوک Block
2.561 [*]	58133.4 ^{**}	355704.2 ^{**}	8	تیمار Treatments
0.690	2630.6	8401.04	16	خطا Error

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

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

افزایش فعالیت‌های آنزیمی، تغییرات نفوذ پذیری 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 $r = 0.46$)، این صفت همبستگی مثبت با جمعیت میکروبی ریزوسفری و نسبت R/S میکروبی داشت ($r = 0.58$)، $P < 0.01$ و همبستگی مثبت و قوی با عملکرد دانه داشت (۰/۸۹) ($r = 0.89$)، $P < 0.01$ (جدول ۴). همبستگی بین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی نیز به اثبات رسیده است (۶۳). به نظر می‌رسد استفاده همزمان لئوناردیت و کود فسفر در تیمار P₅₀ H₁₀₀ باعث کاهش pH خاک و افزایش جذب عناصر غذایی شده و خاکری موجب افزایش عملکرد بیولوژیکی شده است.

عملکرد بیولوژیکی: طبق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، اثر تیمارها بر عملکرد بیولوژیکی گلرنگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین عملکرد بیولوژیکی در تیمار P₅₀ H₁₀₀ با ۱۱۴۷ گرم بر متر مربع (۵۵ درصد افزایش) و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد با ۷۴۱ گرم بر متر مربع مشاهده شد. اختلاف معنی داری بین تیمارهای شاهد، P₅₀ H₁₀₀، P₂₅ H₅₀ و P₅₀ 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 ریشه‌زایی 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، و با فراهمی بستر مناسب برای موجودات مفید



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

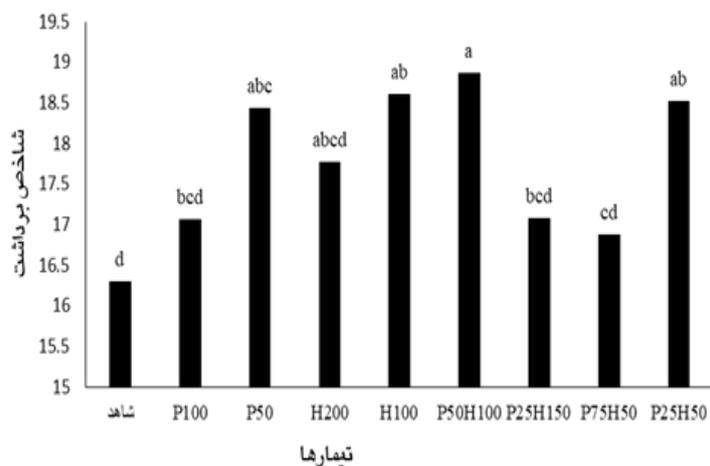
Fig. 7. Comparison of biological yield averages under the influence of different treatments.

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

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

با ۱۶/۳ مشاهده شد (شکل ۸). همچنین عملکرد دانه همبستگی مثبت با شاخص برداشت داشت ($r = 0.40$) 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



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

Fig. 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%).

شرایط اقتصادی محدود می‌توانند مورد توجه قرار گیرند. تیمار P₅₀ (مصرف ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار) با هزینه ۱۹۹۰۰۰۰۰ تومان، از نظر اقتصادی در سطح متوسطی قرار دارد، اما به دلیل اتکای کامل به کود شیمیایی و نداشتن ترکیب آلی، از منظر پایداری زیست‌محیطی قابل توصیه نیست. نکته قابل توجه آن است که کلیه تیمارهای مورد بررسی، از نظر عملکرد تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نشان دادند. بنابراین، حتی در شرایطی که کشاورزان به لحاظ اقتصادی امکان تأمین ترکیبات پرهزینه را نداشته باشند، استفاده از تیمارهای کم‌هزینه و دوست‌دار محیط زیست مانند H₁₀₀ (هزینه: ۵۰۰۰۰۰۰ تومان) می‌تواند جایگزین مناسبی برای بهبود عملکرد نسبت به حالت بدون مصرف کود (شاهد) باشد.

ارزیابی شاخص‌های سلامت خاک: نتایج این پژوهش نشان داد که مصرف لئوناردیت تأثیر مثبتی بر شاخص‌های سلامت خاک داشت. شاخص‌هایی نظیر کربن آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، فعالیت میکروبی و pH خاک به عنوان شاخص‌های کلیدی سلامت زیستی و شیمیایی خاک ارزیابی شدند (۶۵، ۶۶). استفاده از لئوناردیت، به‌ویژه در تیمار H₂₀₀، منجر به افزایش معنی‌دار کربن آلی و نیتروژن کل خاک شد (شکل ۱ و ۲). این امر به ارتقاء کیفیت خاک، بهبود ساختار و افزایش توان نگهداری رطوبت منجر می‌شود که از مهم‌ترین عوامل پایداری اکوسیستم‌های زراعی محسوب می‌گردد (۶۷، ۲۴). همچنین، کاهش نسبت C/N در تیمارهای حاوی لئوناردیت، به‌ویژه H₂₀₀ و P₂₅H₁₅₀ (شکل ۳)، نشان‌دهنده افزایش تجزیه ماده آلی و معدنی‌شدن

ارزیابی اقتصادی تحقیق: در این پژوهش، هزینه تأمین نهاده‌های 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 غیر یارانه‌ای برابر با ۳۸۰۰۰ تومان لحاظ گردید. نتایج محاسبات نشان داد که تیمارها از نظر هزینه مصرفی تفاوت قابل توجهی دارند. تیمار H₂₀₀ (۲۰۰ کیلوگرم لئوناردیت) با مجموع هزینه ۱۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان کم‌هزینه‌ترین گزینه‌ی مؤثر بوده و از نظر زیست‌محیطی نیز به‌عنوان یک منبع کاملاً طبیعی، دارای مزیت قابل توجهی است. از سوی دیگر، تیمار P₅₀H₁₀₀ با ترکیب ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم لئوناردیت، هزینه‌ای برابر با ۲۰۴۰۰۰۰۰۰ تومان داشت که نسبت به عملکرد به‌دست‌آمده، گزینه‌ای متعادل و منطقی ارزیابی می‌شود. تیمار P₂₅H₁₅₀ نیز با هزینه ۲۰۶۷۵۰۰۰۰ تومان، به دلیل سهم بالای لئوناردیت و مقدار نسبتاً پایین‌تر سوپرفسفات، نه تنها از نظر اقتصادی در سطح متوسط قرار دارد، بلکه از لحاظ زیست‌محیطی نیز پس از تیمار H₂₀₀، یکی از ترکیب‌های مطلوب محسوب می‌شود. این تیمار می‌تواند گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست و هم‌زمان با عملکرد مناسب مورد توجه قرار گیرد. در طرف مقابل، تیمار P₁₀₀ با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل، هزینه‌ای معادل ۳۰۸۰۰۰۰۰۰ تومان داشت و به‌عنوان پرهزینه‌ترین تیمار شناخته شد. تیمار P₇₅H₅₀ نیز با هزینه ۳۰۲۷۵۰۰۰۰ تومان در گروه تیمارهای با هزینه بالا قرار گرفت. تیمارهایی نظیر H₁₀₀ (هزینه: ۵۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان) و P₂₅H₅₀ (هزینه: ۱۰۷۲۵۰۰۰۰ تومان) نیز اگرچه دارای هزینه‌های پایین‌تری هستند، اما به‌طور نسبی عملکرد مطلوبی ارائه دادند و در

خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاکی مورد اندازه‌گیری و صفات عملکردی گلرنگ با کاربرد 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. همه‌ی تیمارهای مورد استفاده در تحقیق 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 توام 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

نیتروژن بوده است. این وضعیت می‌تواند کارایی جذب نیتروژن توسط گیاه را افزایش داده و بهبود عملکرد را به دنبال داشته باشد (۶۶). از سوی دیگر، 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 مؤید 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.

نتیجه‌گیری کلی

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده.

Table 5. Correlation coefficients between measured traits.

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

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

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

منابع

1. 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.
2. 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.
3. Sharrifmoghaddasi, M., & Omiditabrizi A. H. (2010). Stability Analysis of Seven Iranian Winter Safflower Cultivars. *World Applied Sciences Journal*, 8 (11), 1366–1369.
4. Zeynali, A. (1999). Safflower (identification, production and consumption). *Publications of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 144p. [In Persian]
5. Anonymous. (2022). Agricultural statistics yearbook (Crop year 2022–2023). Ministry of Agriculture Jihad, Deputy for Planning, Economy, Statistics and Information Technology. [In Persian]
6. Lopes, AS. 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 Nayebi, 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 biochemicals 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 phosphor, 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., Lośák, 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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.1999.244.24>
6.51.
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.

