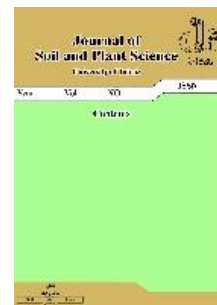




J Soil Plant Sci, 2026, 36(2): 103-121.
<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72717.1043>

Journal of Soil and Plant Science

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



Research Article

Effects of Phosphorus, Sulfur, and Sulfur-Oxidizing Bacterial Inoculants on Yield and Yield Components of Wheat

Alireza Tavasolee^{1✉}, Hossein Beyrami², Reza Hassnpoor³

1-Corresponding Author, Soil and Water Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran. E-mail: ar.tavasolee@areeo.ac.ir

2-National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, AREEO, Yazd, Iran. E-mail: h.beyrami@areeo.ac.ir

3-Soil and Water Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran. E-mail: reza.hassanp@gmail.com

Received: June 2, 2026

Revised: July 4, 2026

Accepted: July 12, 2026

Published: July 16, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

The presence of calcareous parent materials, combined with low precipitation, has led to the development and formation of calcareous and alkaline soils across most regions of Iran. Evaluation of the nutrient status in these soils indicates that despite the abundance of certain essential nutrients (such as phosphorus, iron, and zinc), their soluble and bioavailable forms remain below the threshold required for optimal plant growth and development. Consequently, nutrient deficiency constitutes a major limiting factor for crop production in these soil types. The application of sulfur and organic matter alters soil chemical properties, particularly by reducing soil pH, which subsequently enhances the availability and uptake of nutrients required for wheat (*Triticum aestivum*). Under such conditions, utilizing elemental sulfur combined with an inoculum of sulfur-oxidizing bacteria can serve as an effective strategy to improve plant nutrition and increase yield. In calcareous soils, phosphorus is rapidly fixed, reducing its availability to plant roots. Therefore, any factor capable of decreasing the localized rhizosphere pH can significantly enhance phosphorus use efficiency.

Materials and Methods

This study was conducted to evaluate the effects of sulfur application, combined with a sulfur-oxidizing bacterial inoculant, and varying rates of triple superphosphate (TSP) fertilizer on the yield and yield components of wheat (cv. Alvand) in Osku county, East Azarbaijan province. Wheat seeds were sown on November 14, 2021. Each experimental plot covered an area of 30 m² (10 m in length) with a row spacing of 25 cm. Within each plot, the four central beds were seeded, while the outermost beds (the first and sixth) were left unplanted to serve as guard rows. The experiment was laid out as a factorial based on a randomized complete blocks design (RCBD) with three replications. The factors consisted of four levels of sulfur combined with *Thiobacillus* bacteria [S0: 0 (control), S1: 500 kg ha⁻¹ sulfur + 10 kg ha⁻¹ *Thiobacillus*, S2: 1000 kg ha⁻¹ sulfur + 20 kg ha⁻¹ *Thiobacillus*, and S3: 2000 kg ha⁻¹ sulfur + 40 kg ha⁻¹ *Thiobacillus*] and three levels of TSP fertilizer [P0: 0% (control), P1: 65%, and P2: 100% of the phosphorus requirement based on soil test results].

Results

The results indicated that effects of sulfur and phosphorus on wheat production parameters (grain yield, biological yield, number of spikes per plant, 1000-grain weight, number of tillers per plant, and number of grains per spike) were significant. The main effects of both sulfur and phosphorus significantly influenced several production traits; specifically, phosphorus notably affected grain and biological yields, while sulfur significantly impacted grain yield and certain yield components. The sulfur and

phosphorus interaction ($S \times P$) was significant for some traits and non-significant for others. Overall, increasing sulfur application rate enhanced biological yield and the number of spikes, with the highest biological yield observed in the treatment of S3 (2000 kg ha⁻¹ sulfur + 40 kg ha⁻¹ *Thiobacillus*). However, for 1000-grain weight and tiller number, the optimal response was predominantly recorded at intermediate levels S1 (500 kg ha⁻¹ sulfur + 10 kg ha⁻¹ *Thiobacillus*) or S2 (1000 kg ha⁻¹ sulfur + 20 kg ha⁻¹ *Thiobacillus*). Similarly, phosphorus application generally improved grain yield and its associated components, although the maximum effect was frequently observed at the P1 rate (65% phosphorus requirement) rather than the full requirement level (P2).

Conclusion

Based on the findings of this study, it can be concluded that the combined application of sulfur with sulfur-oxidizing bacteria, alongside balanced phosphorus fertilization, presents an effective strategy for improving wheat growth and yield in nutrient-limited calcareous soils. By reducing the localized rhizosphere pH, these treatments increased the solubility and availability of nutrients. Consequently, the enhanced uptake of phosphorus, iron, zinc, and other micronutrients provided highly favorable conditions for plant growth. Furthermore, the observed increases in grain yield, straw yield, and yield components demonstrated that improving the crop's nutritional status directly enhanced productivity. However, the results also indicated that excessive sulfur application does not necessarily yield further agronomic benefits; in several instances, intermediate treatment levels produced more favorable outcomes compared to the highest application rates. This highlights that the efficacy of this approach heavily relies on determining the optimal sulfur rate, the appropriate type and dosage of the microbial inoculant, as well as the initial soil conditions. Consequently, the implementation of this strategy must be targeted and guided by soil testing and integrated nutrient management. This will not only maximize yield but also prevent the excessive application of fertilizers and mitigate unnecessary economic costs.

Keywords: Biological yield, Calcareous soil, Cereals, Integrated plant nutrition management, Sulfur oxidation.

Author Contributions

Conceptualization and methodology, Tavasolee, A.R.; Performing experiments and measurements, Tavasolee, A.R. and Beyrami, H.; formal analysis and data curation, Beyrami, H.; writing-original draft preparation, Beyrami, H. and Hassanpour, R., writing- review and editing, Tavasolee, A.R. and Hassanpour, R.; supervision, Tavasolee, A.R.; project administration, Tavasolee, A.R. and Beyrami, H.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This article is published as part of the results of an approved project implemented at the Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of East Azarbaijan Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Iran. The authors would like to thank the Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), East Azarbaijan, Iran.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

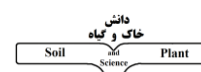
Cite this article: Tavasolee, A.R., Beyrami, H., & Hassanpour, R. (2026). Effects of phosphorus, sulfur, and sulfur-oxidizing bacterial inoculants on yield and yield components of wheat. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(2), 103-121.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72794.1045>

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



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





تأثیر فسفر، گوگرد و زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم

علیرضا توسلی^۱✉، حسین بیرامی^۲، رضا حسن‌پور^۳ 

- ۱- نویسنده مسئول، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. رایانامه: ar.tavasolee@areeo.ac.ir
- ۲- مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. رایانامه: h.beyrami@areeo.ac.ir
- ۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. رایانامه: reza.hassanp@gmail.com

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

چکیده

این پژوهش برای بررسی تأثیر فسفر، گوگرد و زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum*) رقم الوند در شهرستان اسکو استان آذربایجان شرقی اجرا گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و با دو فاکتور شامل چهار سطح گوگرد + باکتری تیوباسیلیوس (S0: عدم مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار) و سه سطح کود سوپرفسفات تریپل (P0: عدم مصرف فسفر، P1: مصرف ۶۵ درصد و P2: مصرف ۱۰۰ درصد فسفر مورد نیاز بر اساس آزمون خاک) بود. نتایج نشان داد که اثر گوگرد و فسفر بر عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، تعداد خوشه در بوته، وزن هزار دانه، تعداد پنجه در بوته و تعداد دانه در خوشه گندم معنادار بود. کاربرد گوگرد و فسفر به صورت منفرد تأثیر معناداری بر تعدادی از صفات تولیدی نشان داد؛ به‌ویژه اثر منفرد فسفر بر عملکرد دانه و زیست‌توده، و اثر منفرد گوگرد نیز بر عملکرد دانه و برخی اجزای عملکرد معنادار بود. اثر متقابل گوگرد و فسفر برای برخی صفات معنادار و برای برخی دیگر غیرمعنادار بود. افزایش سطح گوگرد موجب افزایش زیست‌توده و تعداد خوشه شد. بیشترین زیست‌توده در تیمار S3 مشاهده شد، اما برای وزن هزار دانه و تعداد پنجه بهترین پاسخ غالباً با S1 یا S2 ثبت گردید. بیشترین عملکرد دانه و برخی اجزای عملکرد با مصرف ۶۵ درصد فسفر حاصل شد. پاسخ‌های گندم به مصرف فسفر و گوگرد غیرخطی بود و سطوح میانی آن‌ها اثرهای بهتری داشتند. تیمار تلفیقی فسفر + گوگرد + زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد می‌تواند در خاک‌های آهکی با فسفر کم، جذب فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف و عملکرد گندم را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: اکسایش گوگرد، خاک آهکی، عملکرد زیست‌توده، غلات، مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه.

استناد به این مقاله: توسلی، ع.ر.، بیرامی، ح. و حسن‌پور، ر. (۱۴۰۵). تأثیر فسفر، گوگرد و زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۲)، ۱۰۳-۱۲۱.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72794.1045>

مقدمه

تخمین دو برابر شدن جمعیت کنونی جهان در ۵۰ سال آینده، این پرسش مهم را در بسیاری از کشورها مانند ایران مطرح کرده است که چگونه می‌توان تولید غذا را به دو برابر میزان کنونی افزایش داد (Wilding & Lin, 2006) و باید برای آن راه حل یافت. در این میان غلات به‌ویژه گندم (*Triticum aestivum*) در حفظ امنیت غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد. گندم یکی از محصولات استراتژیک کشور بوده که بالغ بر ۴۵ درصد پروتئین و ۵۵ درصد کالری مورد نیاز کشور را تأمین می‌کند (Eyvazi et al., 2010). گندم گیاهی است یک‌ساله، تک لپه و از خانواده گندمیان (*Gramineae*) و از جنس *Triticum* که دارای گونه‌های بسیار زیاد وحشی و اهلی است. این گیاه به عنوان یکی از اصلی‌ترین مواد غذایی بشر و مهمترین محصول زراعی و ماده غذایی در اکثر کشورها، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از جمله دلایل پایین بودن عملکرد این محصول در کشور ایران، آهکی بودن خاک است. وجود مواد مادری آهکی و کم بودن نزولات آسمانی سبب تحول و پیدایش خاک‌های آهکی و قلیایی در اکثر نقاط ایران شده‌است. بررسی وضعیت عناصر غذایی در خاک‌های آهکی و قلیایی نشان می‌دهد که به رغم وجود مقادیر فراوان برخی از عناصر غذایی (مانند فسفر، آهن و روی) در این خاک‌ها، شکل محلول و قابل جذب این عناصر کمتر از مقدار لازم برای رشد و نمو مناسب گیاه بوده و کمبود عناصر غذایی یکی از عوامل محدودکننده تولید محصول در این نوع خاک‌ها محسوب می‌شود (Rahman et al., 2011).

بهبود حاصلخیزی خاک از مهم‌ترین رویکردهای مؤثر بر افزایش عملکرد محصولات زراعی محسوب می‌شود. کاربرد گوگرد و ماده آلی، با اثرگذاری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌ویژه از طریق کاهش pH، موجب افزایش قابلیت دسترسی و جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه گندم می‌گردد. در چنین شرایطی، استفاده از گوگرد عنصری همراه با زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود تغذیه گیاه و افزایش عملکرد باشد. در خاک‌های آهکی، فسفر به‌سرعت تثبیت می‌شود و قابلیت جذب آن برای ریشه کاهش می‌یابد؛ از این‌رو، هر عاملی که بتواند pH موضعی ریزوسفر را کاهش دهد، می‌تواند در افزایش کارایی مصرف فسفر مؤثر باشد (خاوازی و همکاران، ۱۳۹۷؛ بشارتی و همکاران، ۱۳۸۹).

کاهش pH (حتی به‌طور موضعی) می‌تواند قدرت تثبیت عناصر غذایی در این خاک‌ها را کاهش داده و بر حل‌پذیری آن‌ها در چنین خاک‌هایی بیفزاید. گوگرد مهمترین ماده اسیدزا است که استفاده از آن برای افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی، اصلاح خاک‌های سدیمی، تأمین سولفات مورد نیاز گیاه و به دلیل صرفه اقتصادی در بسیاری از مناطق دنیا متداول بوده و سابقه دیرینه دارد (Vidyalakshmi et al., 2009). کاربرد گوگرد عنصری راهکاری مؤثر برای اصلاح خاک‌های قلیایی و افزایش دسترسی به عناصر غذایی است (Havlin et al., 2014). سازوکار اصلی این اثر، اکسایش زیستی گوگرد به‌وسیله باکتری‌های خاک (به‌ویژه *Thiobacillus*) است که گوگرد را به اسید سولفوریک (H_2SO_4) تبدیل می‌کنند (Brady & Weil, 2008). اسید تولیدشده با کربنات کلسیم (آهک) موجود در خاک واکنش داده و علاوه بر کاهش pH، موجب آزاد شدن کلسیم و سولفات می‌شود (Fageria et al., 2010). سرعت این فرایند به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی نظیر رطوبت، دما و اندازه ذرات گوگرد است؛ به‌طوری که ذرات ریزتر به دلیل سطح تماس بیشتر با میکروب‌ها، سریع‌تر اکسید شده و pH را کاهش می‌دهند.

نتایج تحقیقات (Jalili (2013) نشان داد که اثر متقابل دو فاکتور کود دامی و گوگرد بر عملکرد دانه و شاخص برداشت معنادار بود. بیشترین عملکرد دانه به مقدار ۵۲۴۹ کیلوگرم بر هکتار مربوط به تیمار ۶۰۰ کیلوگرم بر هکتار گوگرد همراه با مصرف ۲۰ تن بر هکتار کود دامی بود. بیشترین کاهش در pH خاک به میزان ۰/۳۸ واحد

مربوط به تیمار ۶۰۰ کیلوگرم بر هکتار گوگرد مشاهده شد. همچنین، Norouzi et al. (2018) در تحقیقی برای بررسی مصرف گوگرد بر روند تغییرات pH و قابلیت جذب فسفر خاک در گندم نیز گزارش نمودند که میزان pH و سولفات قابل جذب خاک در مراحل مختلف اندازه‌گیری در طول رشد گیاه، همچنین فسفر قابل جذب در سطح یک درصد معنادار بود.

در خاک‌های ایران، به‌ویژه خاک‌های آهکی، نقش اصلاحی گوگرد معمولاً از نقش تغذیه‌ای آن مهم‌تر است. با وجود نقش تغذیه‌ای گوگرد در گیاه، شواهد موجود نشان می‌دهد که در بسیاری از خاک‌های آهکی ایران، مسئله اصلی بیشتر pH بالا، آهک فعال و محدودیت دسترسی عناصر غذایی است تا کمبود عمومی و فراگیر گوگرد. از این رو، مصرف گوگرد عنصری در این خاک‌ها عمدتاً به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک توجیه می‌شود، مگر در مواردی که آزمون خاک یا گیاه کمبود سولفات را نشان دهد (Gohargani, 2015). گوگردی که به‌صورت سولفات وارد خاک می‌شود، عمدتاً نقش تغذیه‌ای دارد، در حالی‌که گوگرد عنصری پس از اکسایش به سولفات، اسید تولید کرده و می‌تواند pH خاک را کاهش دهد؛ از این رو بیشتر به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک شناخته می‌شود (Sameni et al., 2004). همچنین گوگرد عنصری می‌تواند در کنترل برخی بیماری‌ها و بهبود شرایط خاک مؤثر باشد (Camberato et al., 2022; Narayan et al., 2023). بنابراین در شرایط خاک‌های ایران، مصرف گوگرد عنصری بیشتر با هدف اصلاح خاک‌های آهکی و قلیایی توجیه می‌شود تا تأمین صرفاً تغذیه‌ای گوگرد.

Javadzadeh (2024) در تحقیقی بر روی اثر باکتری‌های محرک رشد گیاه و گوگرد بر رشد و غلظت عناصر غذایی کم مصرف دانه گندم در خاک‌های شور-سدیمی بیان نمودند که تلفیق باکتری‌های محرک رشد و گوگرد به همراه باکتری *T. thiooxidans* تأثیر معناداری بر عملکرد دانه و غلظت عناصر کم‌مصرف در خاک‌های شور و سدیمی نداشت. به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد انفرادی باکتری *R. pusense* جداسازی شده از خاک‌های شور و سدیمی و گوگرد و یا به همراه باکتری *T. thiooxidans* نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد و غلظت عناصر کم‌مصرف در گندم در خاک‌های شور و سدیمی دارد.

Azimizadeh et al. (2025) در ارزیابی کارایی گوگرد و کود دامی در کاهش محدودیت خاک‌های آهکی و افزایش عملکرد گندم دیم گزارش نمودند که در خاک‌های کم‌آهک، تیمار ترکیبی شامل ۱ تن گوگرد، ۴ تن کود دامی و ۲ درصد باکتری تیوباسیلوس به عنوان راهکار بهینه برای اصلاح خاک و بهبود عملکرد گندم توصیه می‌شود. با توجه به فراوانی گوگرد و اثرات مفید آن بر گیاه و خاک و با توجه به اینکه هرگونه بسترسازی در زمینه مصرف گوگرد در خاک‌های ایران در قدم اول مستلزم وجود مستندات علمی جامعی است که به‌طور دقیق نتایج مورد انتظار از مصرف گوگرد را در سطح قابل قبولی از آزمایشات مزرعه‌ای اثبات نماید، بنابراین در این پژوهش بررسی تأثیر گوگرد و زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد همراه با مصرف فسفر بر عملکرد گندم انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش برای ارزیابی تأثیر گوگرد و زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد همراه با مصرف کود سوپرفسفات تریپل بر عملکرد گندم (رقم الوند) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی با مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه ۵۸ دقیقه شمالی و ۴۶ درجه ۲ دقیقه غربی در شهرستان اسکو استان آذربایجان شرقی اجرا شد. آزمایش به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. فاکتور اول شامل مصرف گوگرد در چهار سطح همراه با مایه‌زنی باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلوس، S1: مصرف ۵۰۰

کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار) بود. فاکتور دوم مصرف کود سوپرفسفات تریپل در سه سطح (P0: بدون مصرف فسفر، P1: مصرف ۶۵ درصد و P2: مصرف ۱۰۰ درصد فسفر مورد نیاز بر اساس آزمون خاک) در سه تکرار بود. برای تهیه زادمایه باکتری‌های اکسید کننده از محیط کشت پستگیت^۱ استفاده شد (Vishniac & Santer, 1975). بدین منظور ابتدا محلول اصلی شامل ترکیبات زیر در موسسه تحقیقات خاک و آب کشور آماده و در نهایت حجم نهایی با آب مقطر استریل به ۱۰۰۰ ml رسید (جدول ۱).

جدول ۱- مقدار و مواد تشکیل دهنده محیط Postgate (محلول اصلی) به ازاء یک لیتر.

۷ g	Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O
۳/۵ g	(NH ₄) ₂ SO ₄
۰/۷ g	MgSO ₄
۰/۰۱ g	FeSO ₄ .7H ₂ O
۰/۴ g	CaCl ₂ .2H ₂ O
۱۵ ml	Micronutrients

لازم به ذکر است که KH₂PO₄ و FeSO₄ و محلول عناصر کمیاب به‌طور جداگانه تهیه و استریل شدند. محلول عناصر کمیاب نیز شامل ترکیبات زیر بود (جدول ۲).

جدول ۲- مقدار و مواد تشکیل دهنده محیط Postgate (محلول عناصر کم‌مصرف) در حجم نهایی یک لیتر.

۵ g	EDTA (ACETAT)
۲/۲ g	ZnSO ₄ .7H ₂ O
۰/۷۲ g	COCl ₂ .2H ₂ O
۰/۱۶ g	MnCl ₂ .4H ₂ O
۰/۵ g	FeSO ₄ .7H ₂ O
۰/۱۱ g	(NH ₄).Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O
۰/۱۵۷ g	CuSO ₄ .5H ₂ O
۰/۱۶۱ g	CoCl ₂ .6H ₂ O

pH محلول عناصر کمیاب بعد از افزودن EDTA با KOH افزایش می‌یافت تا EDTA حل شود. بعد از افزودن تمامی مواد، pH محیط با استفاده از KOH، به ۶ رسانده شد که در این حالت رنگ محیط سبز گردید. هر دفعه به میزان ۱۵ml از آن برای یک لیتر محیط کشت استفاده می‌شد. محلول KH₂PO₄ نیز جداگانه تهیه و استریل شد و برای تهیه آن ۳۰ گرم از KH₂PO₄ در ۲۰۰ml آب مقطر حل و سپس استریل شد. در مجموع ۲۵ میلی لیتر از این محلول برای تهیه یک لیتر محیط کشت استفاده شد. pH محیط پستگیت پس از تهیه با استفاده از KOH یک نرمال، بر روی ۷ تنظیم شد. محلول بروموتیمول بلو (۰/۱۵ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر آب) نیز جداگانه تهیه و به میزان ۱۵ میلی لیتر آن

^۱Postgate

آن به یک لیتر محیط کشت اضافه گردید. پس از تهیه محیط کشت مایع، باکتری‌های مورد نظر تکثیر و با استفاده از ماده حامل پرلیت زادمایه‌های یک کیلوگرمی تهیه و در پلاستیک‌های مناسب بسته‌بندی و همراه گوگرد تهیه شده به منطقه اجرا ارسال شد. همچنین تا زمان کاشت، کود بیولوژیک حاوی باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد مورد نظر در شرایط مناسب نگهداری شدند (دمای ۴ تا ۱۵ درجه سلسیوس).

برای کاشت، ابتدا مزرعه مورد نظر به گونه‌ای انتخاب شد تا خاک آن از لحاظ فسفر زیر حد بحرانی برای گندم (۱۲ تا ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) باشد. قبل از شروع آزمایش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله مقادیر کربن آلی (Walkley & Black, 1934)، قابلیت هدایت الکتریکی، کل مواد خنثی شونده، فسفر، پتاسیم، روی، آهن (Page et al., 1982)، pH (Thomas, 1996) و بافت خاک (Gee & Bauder, 1986) تعیین گردید. تاریخ کشت ۲۳ آبان سال ۱۴۰۰ بود و برای کشت گیاه گندم، بذر مصرفی رقم الوند در کرت‌هایی با مساحت ۳۰ متر مربع و طول ۱۰ متر در ردیف‌هایی با فاصله ۲۵ سانتی‌متر که چهار پشته وسط کشت و دو پشته اول و ششم به صورت نکاشت باقی مانده و مرز محسوب شد، انجام یافت. فاصله بین دو کرت یک متر و فاصله بین تکرارها نیز ۳ متر بود. فسفر مورد نیاز هر تیمار بر اساس تیمارها محاسبه و در زمان کاشت مصرف شد. برای اعمال تیمارهای گوگردی دو هفته قبل از کاشت، ابتدا گوگرد و باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد به خوبی با هم مخلوط شده و سپس به کرت مورد نظر اضافه و پس از مخلوط شدن یکنواخت با خاک، جوی و پشته‌ها ایجاد شد.

میزان کودهای مورد نظر با توجه به نتایج آزمون خاک و در نظر گرفتن حداکثر پتانسیل تولید گندم در منطقه، با لحاظ حد بحرانی عناصر غذایی مؤثر در خاک، (Malakouti & Gheibi, 2000) اعمال گردید. منابع کودی شامل اوره، سوپرفسفات تریپل، سولفات پتاسیم، سولفات روی، سولفات منگنز، سولفات مس و اسید بوریک بودند. پتاسیم و عناصر کم مصرف مورد نیاز در زمان کشت مصرف شد. اوره را در سه نوبت (یک سوم در زمان کاشت، یک سوم در زمان پنجه‌زنی و یک سوم در زمان ساقه رفتن) مصرف گردید. آبیاری نیز براساس نیاز آبی محاسبه و اعمال گردید. برداشت در ۲۶ تیر ۱۴۰۱ از دو پشته وسط با حذف یک متر از ابتدا و انتها انجام گردید. بدین ترتیب سطح برداشت هشت متر مربع بود. پس از برداشت گندم پارامترهای تولید نظیر تعداد خوشه در بوته و در مترمربع، طول خوشه در بوته، وزن هزاردانه، ارتفاع بوته و همچنین عملکرد دانه و کاه در سطح موردنظر در هر تیمار اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمایش و ثبت داده‌ها، تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار آماری SAS و SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام گردید.

نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج آنالیز خاک محل اجرای آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج گویای این است که میزان فسفر خاک کمتر از حد بحرانی برای کشت گیاه گندم می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس تأثیر گوگرد و فسفر بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم در جدول ۳ نشان داده شده‌است. نتایج بیانگر آن است که کاربرد منفرد گوگرد تأثیر معنادار بر عملکرد دانه در سطح احتمال ۵ درصد و کاربرد منفرد فسفر تأثیر معنادار بر عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد داشتند اما اثر متقابل کاربرد گوگرد و فسفر معنادار نبود. اثر کاربرد منفرد فسفر بر روی عملکرد زیست‌توده (کاه و کلش و دانه) در سطح احتمال ۵ درصد معنادار بود، اما اثر کاربرد منفرد گوگرد و اثر متقابل کاربرد توأم گوگرد و فسفر بر عملکرد زیست‌توده معنادار نبود. کاربرد منفرد و توأم گوگرد و فسفر بر روی طول خوشه معنادار نبود (جدول ۴). کاربرد منفرد گوگرد و فسفر بر روی تعداد خوشه در بوته در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود؛ ولی اثر

متقابل آن‌ها بر روی این صفت معنادار نبود. کاربرد منفرد گوگرد و کاربرد توأم گوگرد و فسفر در سطح احتمال ۵ درصد بر میزان وزن هزاردانه معنادار بود، اما کاربرد منفرد فسفر بر روی این صفت اثر معنادار نداشت. همچنین اثر کاربرد منفرد و توأم گوگرد و فسفر تأثیر معناداری بر ارتفاع بوته نداشتند (جدول ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش.

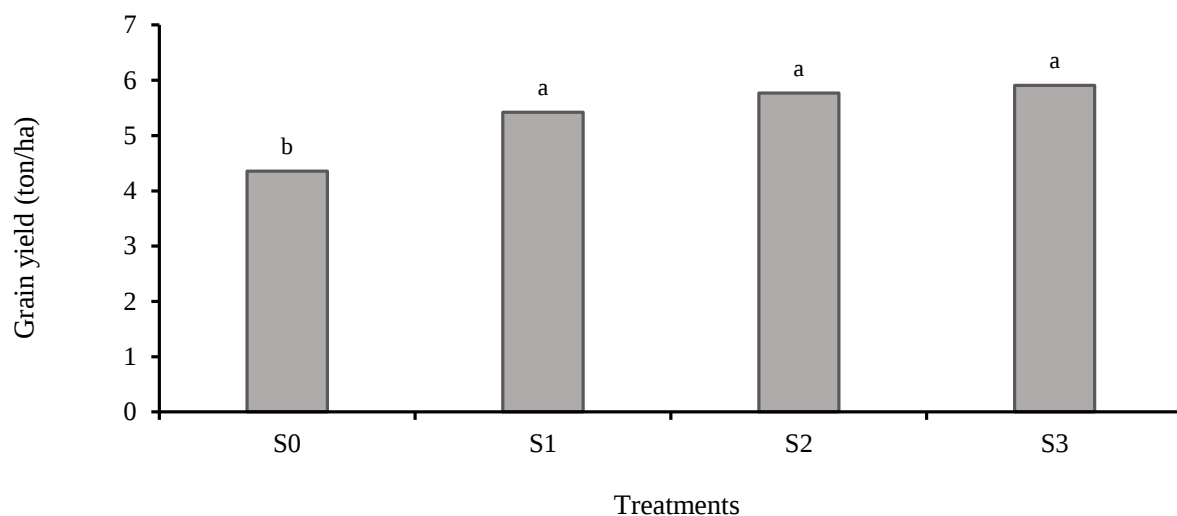
رس	سیلت	شن	Mn	Cu	Zn	Fe	K	P	OC	CCE	pH	EC
(%)	(%)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(%)	(%)		(dS/m)
۱۰	۴۲	۴۸	۲/۸	۱/۱	۰/۶	۲/۲	۲۷۰	۷/۱۴	۰/۴۸	۳	۷/۷	۵/۴۱

CCE، کلسیم کربنات معادل، OC، کربن آلی

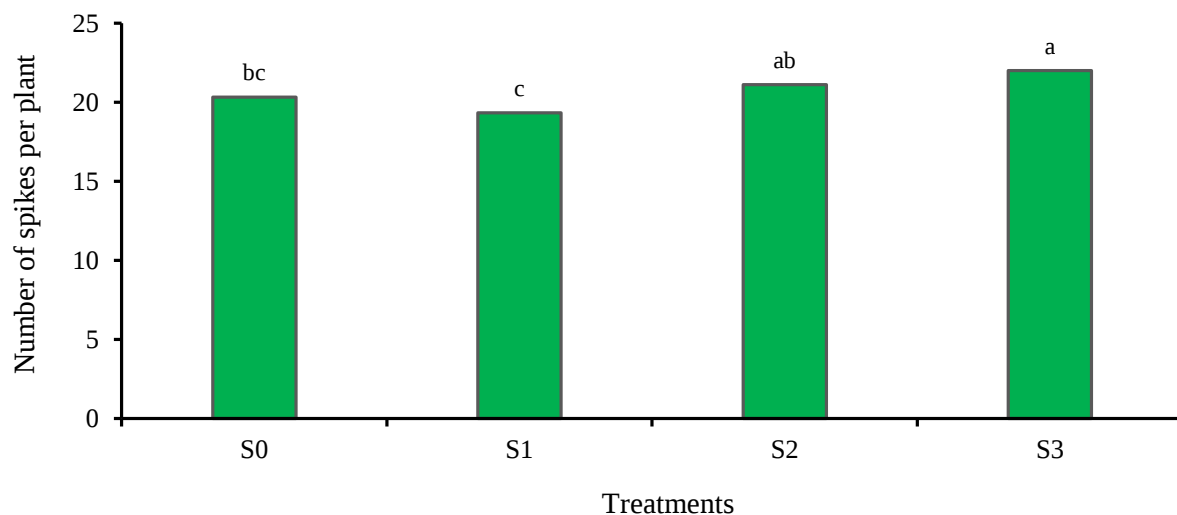
نتایج نشان داد که با افزایش سطوح گوگرد عملکرد زیست‌توده افزایش یافت، و بیشترین میانگین زیست‌توده تولیدی در تیمار ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلوس (S3) بر هکتار مشاهده شد. از نظر عملکرد دانه نیز افزایش میزان گوگرد موجب افزایش این پارامتر نسبت به شاهد (فاقد گوگرد) گردید، اما بین سطوح دیگر مصرف گوگرد اختلاف معناداری نسبت به یکدیگر مشاهده نشد (شکل ۱). از لحاظ تعداد خوشه در بوته بیشترین میزان در تیمار ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلوس (S3) بر هکتار و کمترین میزان آن در تیمار تیوباسیلوس (S0)، مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلوس (S1) مشاهده گردید (شکل ۲). بیشترین میزان وزن هزاردانه در تیمار تیوباسیلوس (S0)، مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلوس (S1) و کمترین میزان آن در تیمار شاهد (بدون کاربرد گوگرد) دیده شد (شکل ۳). کمترین تعداد پنجه در بوته در تیمار تیوباسیلوس (S0) مشاهده شد و با افزایش میزان گوگرد مصرفی تعداد پنجه در بوته افزایش یافت (شکل ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر گوگرد و فسفر بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم.

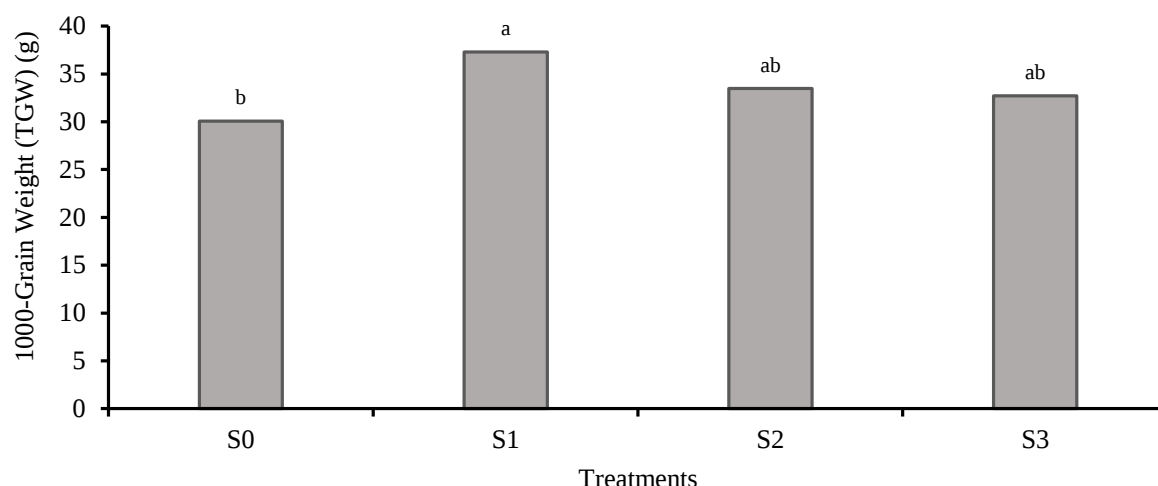
میانگین مربعات							درجه آزادی	منبع تغییر
عملکرد	عملکرد	طول	تعداد خوشه	وزن هزار	ارتفاع	تعداد پنجه		
دانه	زیست‌توده	خوشه	در بوته	دانه	بوته	در بوته		
۰/۷۹ ^{ns}	۱۸/۴ ^{ns}	۰/۷ ^{ns}	۰/۴ ^{ns}	۶۱/۶*	۱۵/۸ ^{ns}	۹/۲۵**	۱۱۰/۷۸ ^{ns}	بلوک
۴/۴۴*	۱۴/۳ ^{ns}	۱/۶ ^{ns}	۱۱/۶**	۷۹/۸*	۸۴/۴ ^{ns}	۴/۲۸**	۴/۶۳ ^{ns}	گوگرد
۵/۷۲**	۲۵/۸*	۱/۷ ^{ns}	۱۰/۱**	۶۸/۴ ^{ns}	۴۵/۳ ^{ns}	۱۰/۳۳**	۳۱۵/۱۹*	فسفر
۰/۵۳ ^{ns}	۴/۵ ^{ns}	۱/۰ ^{ns}	۲/۴ ^{ns}	۶۷/۱*	۵۷/۵ ^{ns}	۵/۱۹**	۹۹/۰۵ ^{ns}	گوگرد × فسفر
۰/۹۸	۶/۰	۱/۲	۱/۶	۱۷/۷	۵۳/۵	۱/۲۹	۷۲/۶۲ ^{ns}	خطا
۲۲/۶	۲۲/۵	۱۱/۵	۸/۴	۱۸/۲	۹/۴	۲۶/۱	۱۷/۰	ضریب تغییرات (/.)



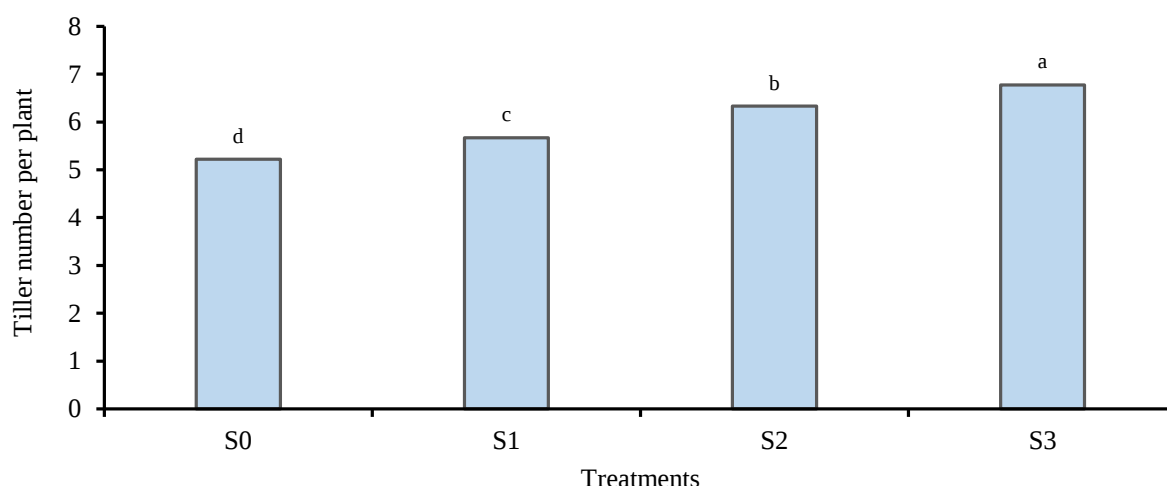
شکل ۱- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گوگرد بر عملکرد دانه. S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار. میانگین‌هایی با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.



شکل ۲- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گوگرد بر تعداد خوشه در بوته. S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.



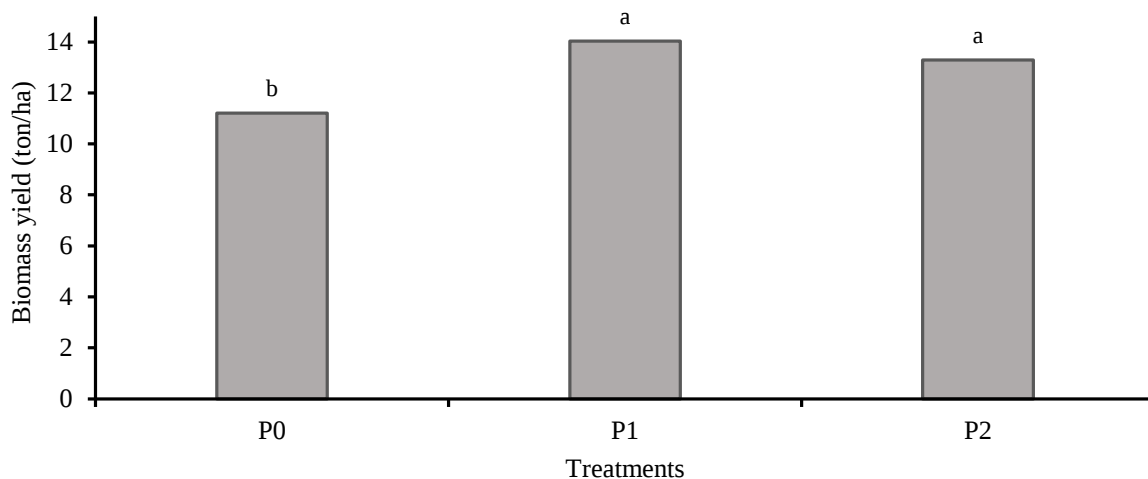
شکل ۳- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گوگرد بر وزن هزار دانه. S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.



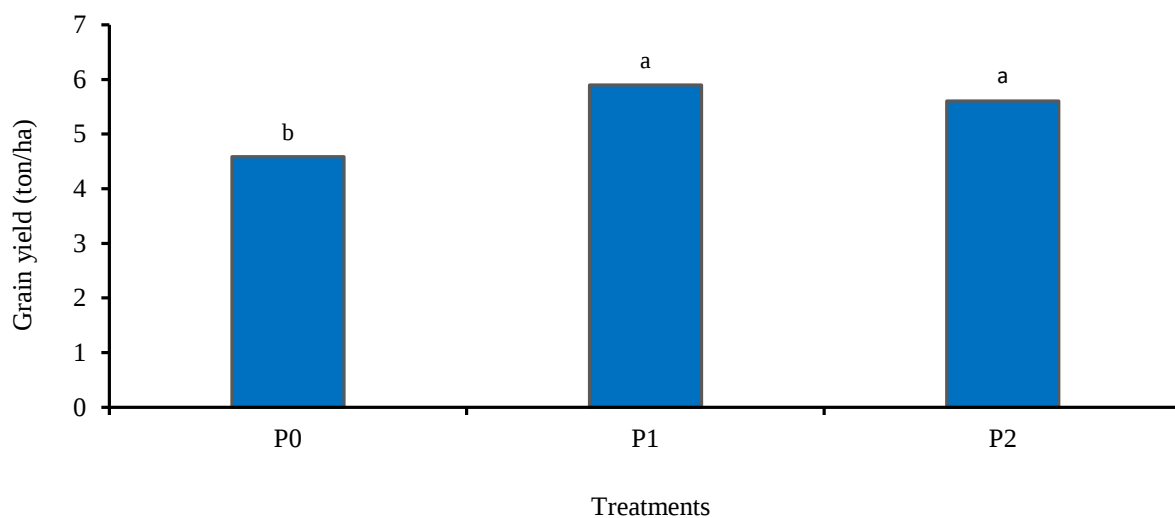
شکل ۴- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف گوگرد بر تعداد پنجه در بوته. S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

با افزایش سطوح فسفر میزان عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه افزایش یافت، ولی بیشترین میانگین زیست‌توده و دانه تولیدی در تیمار P1 (۶۵ درصد مقدار فسفر بر اساس آزمون خاک) مشاهده شد (شکل ۵ و ۶). بیشترین تعداد خوشه در بوته در تیمار P1 (۶۵ درصد مقدار فسفر بر اساس آزمون خاک) و کمترین میزان آن در تیمار شاهد بدون مصرف کود فسفر (P0) مشاهده گردید (شکل ۷). بیشترین میزان وزن هزاردانه در تیمار P1 (۶۵ درصد مقدار فسفر بر اساس آزمون خاک) و کمترین میزان آن در تیمار شاهد (بدون کاربرد فسفر) دیده شد. بیشترین میزان پنجه در بوته در تیمار P1 (۶۵ درصد مقدار فسفر بر اساس آزمون خاک) و کمترین میزان آن در تیمار شاهد (بدون

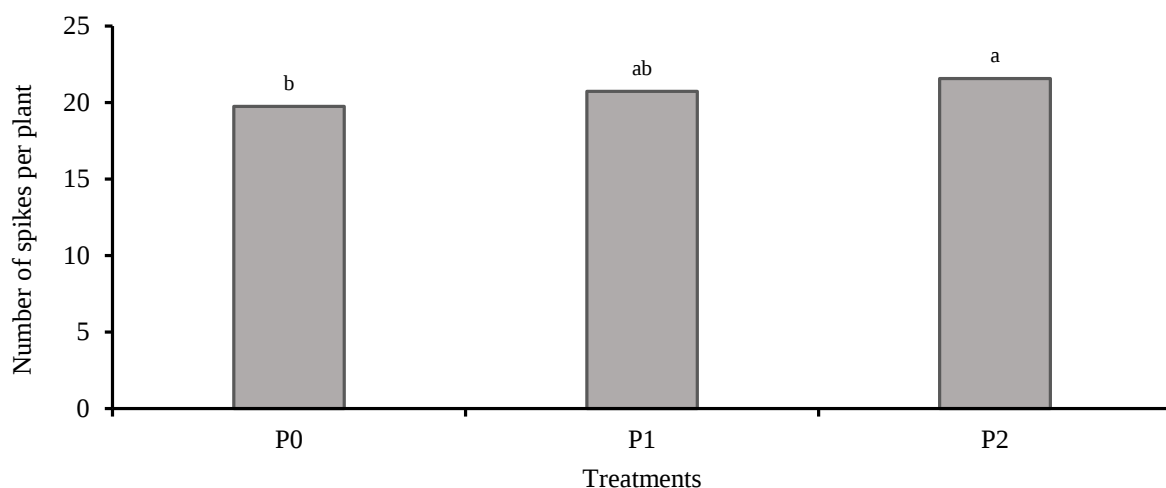
کاربرد فسفر) دیده شد (شکل ۸). بیشترین تعداد تعداد دانه در خوشه در تیمار P1 (۶۵ درصد مقدار فسفر بر اساس آزمون خاک) و کمترین میزان آن در تیمار شاهد بدون مصرف کود فسفر (P0) مشاهده گردید (شکل ۹).



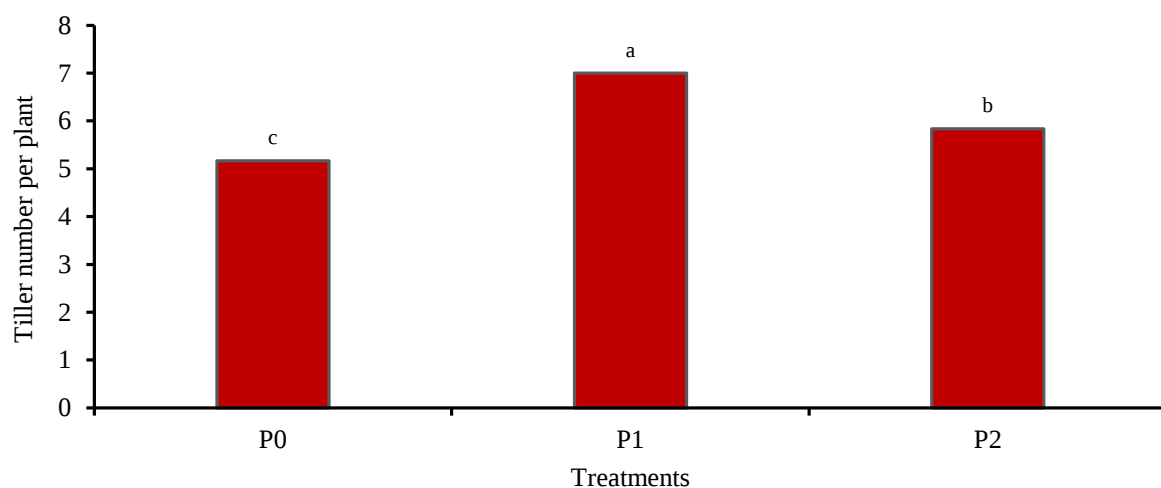
شکل ۵- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف فسفر بر عملکرد زیست‌توده. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.



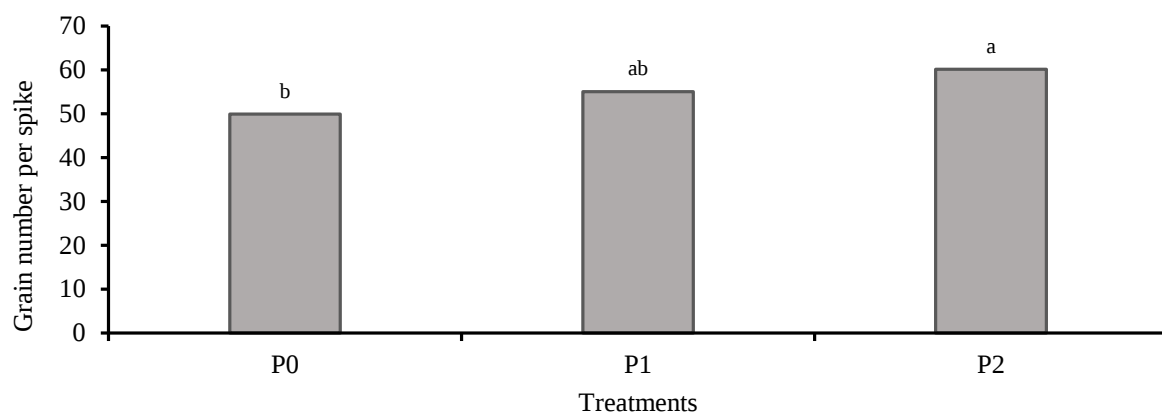
شکل ۶- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف فسفر بر عملکرد دانه. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.



شکل ۷- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف فسفر بر تعداد خوشه در بوته. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

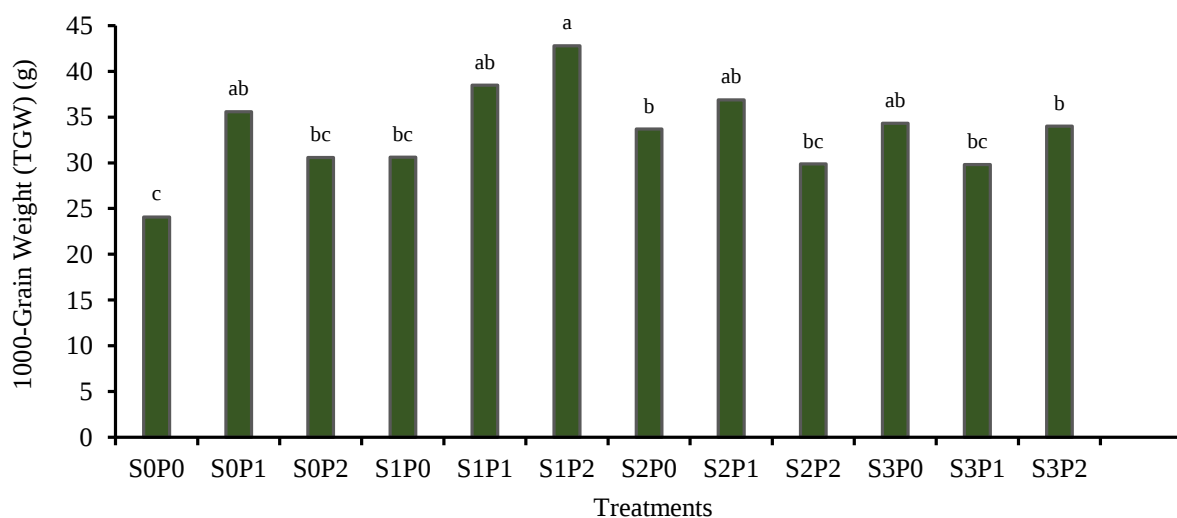


شکل ۸- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف فسفر بر تعداد پنجه در بوته. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

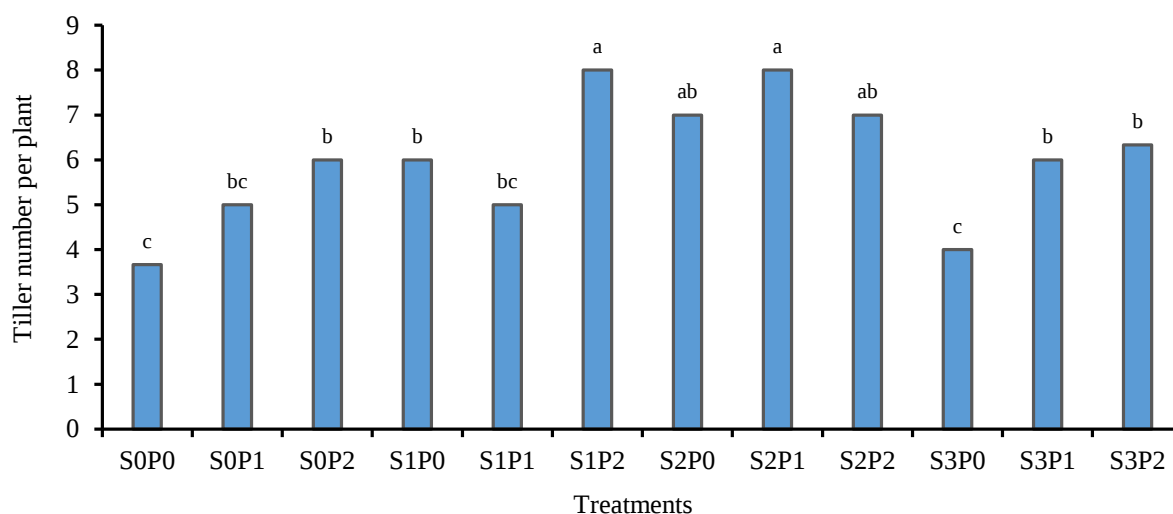


شکل ۹- تأثیر کاربرد مقادیر مختلف فسفر بر تعداد دانه در خوشه. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب اثر متقابل کاربرد گوگرد و فسفر بر وزن هزار دانه و تعداد پنجه در بوته را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار وزن هزار دانه در تیمار سطح یک گوگرد و سطح دو فسفر (S1P2) مشاهده شد. کمترین میزان وزن هزاردانه نیز در تیمار شاهد (S0P0) یعنی بدون مصرف کود گوگرد و فسفر مشاهده گردید (شکل ۱۰). در ارتباط با تعداد پنجه در بوته، بیشترین مقدار این صفت در تیمارهای S2P1 (مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و تأمین ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک) S1P2 (مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس تأمین ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک) مشاهده گردید و کمترین تعداد پنجه در بوته نیز در تیمار شاهد دیده شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- اثر متقابل کاربرد توأم گوگرد و فسفر بر وزن هزار دانه. S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.



شکل ۱۱- اثر متقابل کاربرد توأم گوگرد و فسفر بر تعداد پنجه در بوته. S0: بدون مصرف گوگرد و تیوباسیلیوس، S1: مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس، S2: مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس و S3: مصرف ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۴۰ کیلوگرم تیوباسیلیوس بر هکتار. P0: بدون مصرف کود سوپرفسفات تریپل، P1: مصرف ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل و P2: ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک. میانگین‌های با یک حرف لاتین یکسان، در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد سطوح مختلف گوگرد و زادمایه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و فسفر بر صفات عملکردی گندم اثر معنادار داشت. افزایش محصول گیاهان مختلف با مصرف کود سوپرفسفات تریپل به‌وسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (Motalebifard *et al.*, 2013; Markarian *et al.*, 2015; Kazemalilou *et al.*, 2018; Mardomi *et al.*, 2019; Kazemalilou *et al.*, 2023; 184. Salimi Tarazoj *et al.*, 2024; Bromand *et al.*, 2025). مصرف کود فسفر با افزایش شاخص کلروفیل برگ‌ها می‌تواند فتوسنتز گیاه و تولید محصول را افزایش دهد (Markarian *et al.*, 2016). به‌طور کلی، نتایج نشان داد که پاسخ گیاه به تغییرات گوگرد و فسفر در همه صفات به‌صورت خطی نبود و در بعضی موارد، تیمارهای حد واسط نسبت به مقادیر بالاتر کارایی بهتری نشان دادند. این موضوع نشان می‌دهد که در مدیریت تغذیه گندم، تعیین سطح بهینه گوگرد و مایه‌زنی، اهمیت بیشتری از افزایش صرف مقدار مصرف دارد. کاهش pH با افزایش فعالیت میکروبی و اکسایش گوگرد به اسید سولفوریک قابل توجه است؛ فرایندی که در خاک‌های آهکی می‌تواند تثبیت فسفر را کاهش دهد و شرایط را برای جذب بهتر عناصر غذایی فراهم کند. این افزایش را می‌توان به دو سازوکار اصلی نسبت داد: نخست، کاهش pH و افزایش حل‌پذیری عناصر کم‌مصرف، دوم، افزایش فعالیت زیستی ریزوسفر و تقویت فرایندهای آزادسازی و انتقال عناصر به گیاه (Rostami *et al.*, 2026).

بنابراین، تیمارهای تلفیقی در مقایسه با تیمارهای منفرد، از نظر تغذیه‌ای کارآمدتر بودند. یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش‌شده به‌وسیله محققان دیگر (Besharati *et al.*, 2010; Khavazi *et al.*, 2018; Javadzadeh *et al.*, 2024) هم‌راستا بود. برای مثال، گزارش شده‌است که کاربرد گوگرد و باکتری تیوباسیلیوس در خاک‌های

آهکی، جذب فسفر و عملکرد گندم را افزایش می‌دهد و این اثر به‌ویژه در شرایط کمبود فسفر محسوس‌تر است. همچنین در پژوهش‌های جدیدتر روی خاک‌های شور-سدیمی نیز مشاهده شده که گوگرد همراه با باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند رشد دانه و غلظت ریزمغذی‌ها را بهبود دهد. این هم‌سویی نتایج نشان می‌دهد که نقش گوگرد و مایه‌زنی میکروبی در بهبود تغذیه گندم، به شرایط خاک محدود نیست و در دامنه‌ای از خاک‌های دارای محدودیت نیز قابل مشاهده است. از سوی دیگر، مرورهای جدید بر باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد نیز تأکید کرده‌اند که این گروه میکروبی با افزایش اکسایش گوگرد و اصلاح pH محیط ریشه، می‌توانند کارایی مصرف کودهای فسفاته را افزایش دهند. بنابراین، نتایج این پژوهش از نظر سازوکار عمل نیز با دانش موجود سازگار است. با این حال، تفاوت در شدت پاسخ گیاه بین پژوهش‌ها احتمالاً ناشی از تفاوت در نوع خاک، مقدار اولیه فسفر، شرایط رطوبتی، و گونه یا سویه میکروبی مورد استفاده بوده است.

همچنین، کاهش پاسخ گیاه به دوزهای بالای گوگرد می‌تواند به مقدار پایین آهک (حدود ۳ درصد) در خاک مورد مطالعه نسبت داده شود. اثربخشی گوگرد عنصری به عنوان یک عامل اسیدی‌کننده، به شدت به ظرفیت بافر خاک و وجود جمعیت‌های میکروبی فعال قادر به هدایت فرآیند اکسایش گوگرد وابسته است. پایین بودن میزان آهک نشان‌دهنده ظرفیت محدود خاک برای تبدیل بیولوژیک گوگرد و همچنین توانایی پایین در نگهداری و مدیریت تغییرات شیمیایی است؛ این امر در نهایت پتانسیل مزایای کاربرد مقادیر مازاد گوگرد بر وضعیت تغذیه‌ای و رشد محصول را محدود می‌کند.

علاوه بر این نتایج این تحقیق هم نشان می‌دهد که مصرف گوگرد موجب افزایش عملکرد گندم گردیده ولی با توجه به اینکه اسکو منطقه مورد کاشت گندم جزء مناطق سرد محسوب می‌شود و بدین خاطر بنظر می‌رسد فرصت کافی برای اکسایش گوگرد و تاثیر آن بر داشتن اثر متقابل با تیمار کود فسفوری حاصل نشده و لذا میتوان نتیجه گرفت که برای بهره مندی از اثرات مصرف گوگرد با باکتری تیوباسیلوس بایستی کاربرد آن در محدوده زمانی باشد که فرصت برای فعالیت اکسایشی باکتری‌ها فراهم باشد. اگرچه سطح فسفر اولیه در خاک پایین بود (۷ میلی‌گرم در کیلوگرم)، اما کاربرد دوز بالای فسفر (۱۰۰ کیلوگرم فسفر بر هکتار) احتمالاً منجر به بروز آنتاگونیسم عناصر شده است. در سطوح بالای فسفات، جذب و انتقال ریزمغذی‌های ضروری، به‌ویژه روی و آهن، به دلیل تشکیل کمپلکس‌های نامحلول فسفات-فلز و همچنین تداخل فیزیولوژیک در سطح ریشه، دچار ممانعت می‌شود (Marschner, 2012). این کمبود القایی ریزمغذی‌ها در اثر مصرف بیش از حد فسفر، یکی از دلایل شناخته شده کاهش عملکرد در بسیاری از محصولات است.

نتایج تحقیق (Jalili et al. (2013 نیز نشان دهنده آن است که با افزایش گوگرد و کود دامی عملکرد، اجزای عملکرد و درصد پروتئین گندم افزایش یافت، به‌طوری‌که در مورد گوگرد بیشترین افزایش در کلیه صفات مورد مطالعه مربوط به مصرف ۶۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار بود. (Moamen et al. (2011 نیز در تحقیقات خود گزارش کردند که افزایش میزان گوگرد سبب افزایش معنادار عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، ارتفاع بوته و شاخص سطح برگ گندم شد. (Godarzi (2001 در بررسی اثر گوگرد و کمپوست بر افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی خاک و عملکرد گندم نشان داد که مصرف گوگرد عملکرد دانه گندم را ۱۹۰ کیلوگرم بر هکتار نسبت به شاهد افزایش داد. در آزمایشی اثر کود سولفات پتاسیم و گوگرد عنصری بر گندم مورد بررسی قرار گرفت و به ترتیب افزایش ۹۰ و ۱۹۰ درصدی در عملکرد گندم با کودهای گوگرد عنصری و سولفات پتاسیم گزارش شد. علت پایین بودن افزایش عملکرد در تیمار گوگرد عنصری زمان کم اکسیداسیون گزارش شده است. شدت اکسیداسیون

بیولوژیک گوگرد در خاک‌ها به جمعیت باکتری تیوباسیلوس در خاک، اندازه ذرات گوگرد عنصری و شرایط محیطی بستگی دارد. همچنین این باکتری‌ها به عناصر غذایی نیاز دارند. بنابراین فرایند اکسیداسیون گوگرد در خاک‌های حاصلخیز سریع‌تر صورت می‌گیرد. بسیاری از محققان نشان دادند که کاربرد باکتری‌های تیوباسیلوس موجب افزایش عملکرد، پروتئین و روغن دانه کنجد (EL-Habbasha et al., 2007) و پروتئین دانه گندم (Shinde et al., 2004) گردید.

همچنین، Rahimiyan (2012) گزارش کرد که مصرف همزمان گوگرد و زادمایه تیوباسیلوس به همراه کود حیوانی می‌تواند باعث کاهش pH خاک شده و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر و عناصر کم‌مصرف را بالا ببرد و سبب افزایش عملکرد کلزا شود. گوگرد در اثر اکسایش و تولید اسید سولفوریک شرایط لازم را برای کاهش pH خاک در مقیاس کوچک و در اطراف ذرات خود ایجاد می‌کند بنابراین می‌تواند به ویژه در منطقه ریزوسفر در انحلال ترکیبات نامحلول و آزاد شدن عناصر غذایی مؤثر واقع شود.

Khadem et al. (2014) نیز در تحقیقات خود بیان داشتند که با افزایش سطوح گوگرد به همراه باکتری تیوباسیلوس و فسفر، جذب عناصر در خاک افزایش یافت. افزایش هدایت روزنه‌ای برگ‌ها با مصرف کود فسفر در خاک با رطوبت حدود ظرفیت مزرعه‌ای می‌تواند سبب افزایش کشتش تعرقی و جذب بیشتر عناصر غذایی شود (Motalebifard et al., 2014). Salimpour et al. (2010) به نقش مؤثر باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد در افزایش جذب فسفر و عملکرد کلزا در خاک‌های آهکی اشاره کرده‌اند. کاربرد گوگرد در خاک‌های آهکی و اکسایش آن به‌وسیله باکتری‌های جنس تیوباسیلوس به ویژه *T. thiooxidans*، ضمن کاهش موضعی pH خاک می‌تواند نقش مؤثری در افزایش قابلیت جذب عناصر داشته باشد (Aria et al., 2010). کاهش pH خاک در نتیجه کاربرد گوگرد می‌تواند بدلیل اکسایش گوگرد در نتیجه فعالیت جامعه میکروارگانیسم‌هایی باشد که به‌طور طبیعی در خاک وجود دارند (Vidyalakshmi et al., 2009). Ravi et al. (2008) افزایش تولید ماده خشک با مصرف گوگرد در گلرنگ را به‌دلیل افزایش رشد ریشه و تشکیل کلروفیل که منجر به افزایش فتوسنتز شد، ذکر کرده‌اند.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از گوگرد همراه با باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و تأمین متعادل فسفر، راهکاری مؤثر برای بهبود رشد و عملکرد گندم در خاک‌های آهکی و دارای محدودیت تغذیه‌ای است اما سطوح گوگرد استفاده شده باید با لحاظ مقدار آهک خاک و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه تعیین گردد. در این تحقیق تیمارهای اعمال شده با کاهش pH موضعی ریزوسفر، افزایش حل‌پذیری و فراهمی عناصر غذایی، و در نهایت بهبود جذب فسفر، آهن، روی و سایر عناصر کم‌مصرف، شرایط مناسبی را برای رشد گیاه فراهم کردند. همچنین افزایش عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده و اجزای عملکرد نشان داد که بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه مستقیماً به ارتقای عملکرد منجر شده‌است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که افزایش بیش از حد گوگرد لزوماً موجب افزایش بیشتر عملکرد نمی‌شود و در برخی موارد، سطوح متوسط تیمارها (مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۲۰ کیلوگرم تیوباسیلوس و تأمین ۶۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک و مصرف ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد + ۱۰ کیلوگرم تیوباسیلوس تأمین ۱۰۰ درصد کود سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک) نسبت به سطوح بالاتر نتایج مطلوب‌تری ایجاد کردند که این امر علاوه بر افزایش بهره‌وری در صرفه اقتصادی استفاده از این مواد نیز بسیار می‌تواند مفید باشد. این موضوع بیانگر آن است که کارایی این روش به تعیین مقدار بهینه گوگرد، نوع و

مقدار زادمايه، و همچنین شرایط اولیه خاک وابسته است. در نتیجه، استفاده از این رویکرد باید به صورت هدفمند و بر پایه آزمون خاک و مدیریت تلفیقی تغذیه انجام شود تا علاوه بر افزایش عملکرد، از مصرف بی‌رویه کودها و هزینه‌های اضافی نیز جلوگیری شود.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

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

منابع مورد استفاده

References

- Aria, M. M., Lakzian, A., Haghnia, G. H., Berenji, A. R., Besharati, H., & Fotovat, A. (2010). Effect of *Thiobacillus*, sulfur, and vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. *Bioresource Technology*, 101(2), 551-554.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.093>
- Azimzadeh, Y., Mohammadzadeh, A., Kooselou, M. & Javidan, A. (2025). Evaluation of sulfur and manure efficiency in mitigating calcareous soils constraint and improving rainfed wheat yield. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 14(1), 113-130. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22092/idaj.2025.369427.449>
- Azimzadeh, Y., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Khataee, A. (2020). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12), 1649-1664.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1802012>
- Besharati, H., Sadatnoori, S., Nikniaei, A. B., Irannejad, H., Akbari, A. & Falah Nosratabadi, A. R. (2010). Effect of sulfur and *Thiobacillus* inoculum on phosphorous uptake and yield of wheat in calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 41(1), 121-129. (in Persian with English abstract) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008479.1389.41.1.13.2>
- Bromand, D.H., Reyhanitabar, A., Najafi, N., & Ghoreyshi, S.J. (2025). The Effect of nitrogen (from two sources: urea and ammonium bicarbonate) and phosphorus on some agronomic traits of corn in an alkaline sandy loam soil under greenhouse conditions. *Applied Soil Research*, 13(3), 1-16. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.30466/asr.2025.56412.1898>
- Brady, N. C., Weil, R. R., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Camberato, J., Casteel, S., & Steinke, K. (2022). *Sulfur deficiency in corn, soybean, alfalfa, and wheat*. Purdue University Extension.
- El-Habbasha, S. F., Abd El Salam, M. S., & Kabesh, M. O. (2007). Response of two sesame varieties (*Sesamum indicum* L.) to partial replacement of chemical fertilizers by bio-organic fertilizers. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3(6), 563-571.
- Eyvazi, J., Iraninezhad, H., Klianmehr, M.H., Esmaili, M. & Akbari, G.A. (2010). Effect of slow release nitrogen from animal manure pellet fertilizer and urea on quality and quantity yields of wheat. *Journal of Crop Ecophysiology*, 2(2), 129-135. (in Persian with English abstract)
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (2010). *Growth and mineral nutrition of field crops*. CRC press.
- Gee, G.W. & Bauder, J.W. (1986). Particle-Size Analysis. Pp. 383-411. In: Klute, A., Ed., *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd Edition, Soil Science Society of America, Madison, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. Pp. 383-411. In: A. Klute (Ed.) *Methods of soil analysis: Part1. Physical and mineralogical methods*. 5.1, USA.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>

- Godarzi, K. 2001. Enhancing effects of sulfur and compost on nutrient availability and wheat yield. *Water and Soil Science (Journal of Soil and Plant Science)*, 15, 154-166. (in Persian with English abstract)
- Gohargani, J. (2015). Effect of sulfur, organic matter and *Thiobacillus* on availability of micronutrients in canola seeds in a calcareous soil. *Journal of Soil Biology*, 3(1), 73-82. <https://doi.org/10.22092/sbj.2015.102227>
- Havlin, J. L. (2014). Soil: fertility and nutrient management. Pp. 460-469. In: Wang, Y. (Eds). *Encyclopedia of Natural Resources - Land - Volume 1*. CRC Press.
- Jalili, F., Nasrolah Zadeh Asl, A., and Valiloo, R. 2013. Effects of sulfur and manure fertilizer on yield and protein of wheat (var. Zarin). *Journal of Research in Crop Science*, 5, 71-84. (in Persian with English abstract)
- Javadzadeh, M., Khavazi, K., Ghanavati, N., Jafarnejady, A. & Jahandideh Mahjenabadi, V. A. (2024). Effect of plant growth-promoting bacteria and sulfur on growth and micronutrient concentration in wheat grain in saline-sodic soils. *Journal of Soil Biology*, 11(2), 167-182. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/sbj.2024.356053.225>
- Kazemalilou S., Najafi N., & Reyhanitabar A. (2018). Increasing the yield and yield components of sunflower by integrated application of phosphorus and sewage sludge under optimum and limited irrigation conditions. *Journal of Water and Soil*, 31(6), 1637–1650. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i6.61402>
- Kazemalilou, S., Najafi, N., Reyhanitabar, A., Ghaffari, M., & Azadmard-Damirchi, S. (2023). Sewage sludge and phosphorus increase seed yield, oil and protein concentrations and water use efficiency of sunflower under different levels of water supply. *Gesunde Pflanzen*, 75, 2865–2877. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00864-x>
- Khadem, A., Golchin, A. & Zaree, E. (2014). Effects of manure and sulfur on nutrients uptake by corn (*Zea mays* L.). *Applied Field Crops Research*, 27(103), 2-11. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/aj.2014.101198>
- Khavazi, K., Jahandideh mahjan abadi, V. A. & Taghipoor, F. (2018). Effect of sulfur, *Thiobacillus* bacteria and phosphorus on the yield and nutrient elements uptake of wheat in calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(2), 23-41. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22069/ejsms.2018.13665.1761>
- Malakouti, M.J., & Gheibi, M.N. 2000. *Determination of critical levels of nutrients in soil, plant and fruit*. Agricultural Education Publishing, 92p. (in Persian with English abstract)
- Mardomi S., Najafi N., Reyhanitabar A., & Dehghan G. (2019). Antioxidant enzymes activities and dry matter of rice plant as affected by interactions of lead, phosphorus and zinc. *The Philippine Agricultural Scientist*, 102(4), 310–321. <https://doi.org/10.62550/FZ6043018>
- Markarian, S., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2015). Effects of *Sinorhizobium meliloti* bacterium and phosphorus on leaf chlorophyll index, nitrogen and phosphorus concentrations in alfalfa shoot and root under drought stress conditions. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Soil and Plant Science)*, 24(4/1), 27–45. (in Persian with English abstract)
- Markarian, S., Najafi, N., Aliasgharzad, N., & Oustan, S. (2016). Interactive effects of *Ensifer meliloti* (*Sinorhizobium meliloti*) and phosphorus on some growth characteristics of alfalfa under soil water deficit conditions. *Journal of Soil Biology*, 3(2), 163–178. (in Persian with English abstract) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23452536.1394.3.2.7.9>
- Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.
- Moamen, A., Pazoki, A., and Momayezi, M.R. 2011. Effects of granular sulfur (bentonitic) and compost on quantitative and qualitative characteristics of Bam wheat in Semnan. *Journal of Crop Physiology*, 3, 31-47. (in Persian with English abstract)
- Motalebifard, R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., & Valizadeh M. (2013). The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions. *Scientia Horticulturae*, 162, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.043>
- Motalebifard R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., & Valizadeh M. (2014). Effects of soil moisture, phosphorus and zinc levels on the growth attributes of potato in greenhouse

- conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1), 75–86. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.51173>
- Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A. K. (2023). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Norouzi, S., Sohrabi, A., Khavazi, K. & Matinfar, H. R. (2018). Effect of sulfur application on soil ph and phosphorus availability for wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Sol Biology*, 6(1), 29–41. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/sbj.2018.117145>
- Page, A. L. (Ed.). (1982). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc. USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed>
- Rahimiyan, Z. (2012). Effect of sulfur and *Thiobacillus* with organic matter on quantitative and qualitative traits of canola. *Journal of Crop Physiology*, 3(12), 19-27. (in Persian with English abstract) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008403.1390.3.12.2.3>
- Rahman, M.M., Soaud, A.A., Fareed, H.A.L., Darwish, F.F.A., Golam F., & Azirun, M.S. (2011). Growth and nutrient uptake of maize plants as affected by elemental sulfur and nitrogen fertilizer in sandy calcareous soil. *African Journal of Biotechnology*, 10, 12882-12889. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2075>
- Ranadev, P., Revanna, A., Bagyaraj, D.J., & Shinde, A.H. (2023). Sulfur oxidizing bacteria in agro ecosystem and its role in plant productivity-a review. *Journal of Applied Microbiology*, 134(8), 1xad161. <https://doi.org/10.1093/jambio/1xad161>
- Ravi, S., Channal, H. T., Hebsur, N. S., Patil, B. N., & Dharmatti, P. R. (2008). Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 21(3), 382-385.
- Rostami, G., Heidari, G. and Khalesro, S. (2026). The Effects of different levels of sulfur fertilizer and *AcidiThiobacillus* on yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber and some soil nutrients. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 35(4), 15-32. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/saps.2024.59394.3144>
- Salimpour, S. I., Khavazi, K., Nadian, H., Besharati, H., & Miransari, M. (2010). Enhancing phosphorous availability to canola (*Brassica napus* L.) using P solubilizing and sulfur oxidizing bacteria. *Australian Journal of Crop Science*, 4(5), 330-334. <https://doi.org/10.3316/informit.414621858051487>
- Sameni, A. M., & Kasraian, A. (2004). Effect of agricultural sulfur on characteristics of different calcareous soils from dry regions of Iran. II. Reclaiming effects on structure and hydraulic conductivity of the soils under saline-sodic conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(9-10), 1235-1246. <https://doi.org/10.1081/CSS-120037542>
- Shinde, D.B., R.M. Kadam & A.C. Jadhav. 2004. Effect of sulfur oxidizing microorganism on growth of soybean. *Journal of Maharashtra Agricultural University*, 29,305-307.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3. Chemical methods*, 5, 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Vidyalakshmi, R., Paranthaman, R., & Bhakyaraj, R. (2009). Sulphur Oxidizing Bacteria and Pulse Nutrition- A Review. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(3), 270-278.
- Vishniac, W., & Santer, M. (1957). The *Thiobacilli*. *Bacteriological Reviews*, 21(3), 195-213. <https://doi.org/10.1128/br.21.3.195-213.1957>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wilding, L. P., & Lin, H. (2006). Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. *Geoderma*, 131(3-4), 257-274. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.028>