Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Effect of Sulfur Application and Soil Moisture Content on Sulfur Oxidation and Chemical Properties in Calcareous Soils

Jalal Ghaderi[1]✉ | **Mohammad Hossein Davoodi**[2], **Neda Mohammadi**[3], **Karim Shahbazi**[4] | **Kamal Khalkhal**[5]

1. Corresponding Author, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran. Coresponding Author's E-mail: ghaderijalal@gmail.com
2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. E-mail: davoodi_mh@gmail.com
3. Soil and Water Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran. E-mail: nmohamadi52@yahoo.com
4. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. E-mail: shahbazikarim@yahoo.com
5. Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran. E-mail: kamalkhalkhal@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 11, 2025

Revised: Dec. 15, 2026

Accepted: Feb. 15, 2026

Published online: March. 2026

Keywords:
Calcareous soil,
Moisture,
Oxidation,
Sulfur,
Thiobacillus.

Calcareous soils constitute more than 87 percent of Iran's agricultural lands. This study aimed to investigate the effect of different sulfur levels (0, 500, and 1000 kg/ha) under two moisture conditions (40% and 60% of saturated moisture) on sulfur oxidation and some chemical properties of calcareous and non-calcareous soils inoculated with Thiobacillus bacteria. The results showed that the highest sulfur oxidation rate occurred at 40% moisture and a dose of 500 kg/ha, which created optimal conditions for sulfur-oxidizing microbial activity and adequate soil aeration. Increasing moisture to 60% led to a reduction in the oxidation rate due to oxygen limitation and decreased microbial activity. In this study, the most significant decrease in pH and increase in electrical conductivity (EC), available phosphorus, sulfate, iron, and zinc concentration of the five soils were related to the treatment of 1000 kg/ha at 40% moisture. Among the soils, the largest pH reduction was recorded in Qezelr soil (a decrease of 0.87 units), while Babol soil showed the highest increase in EC (1.19 dS/m) and the highest concentrations of available phosphorus (41.1 mg/kg), sulfate (2690 mg/kg), iron (62.9 mg/kg), and zinc (1.25 mg/kg). In contrast, Sharifabad soil, with a 44% calcium carbonate equivalent content, demonstrated the least sensitivity to sulfur oxidation and subsequent pH changes. The results of this study indicate that sulfur application combined with optimal moisture can be used as an efficient strategy for the reclamation of soils with calcium carbonate content below 50%.

Cite this article: Ahmadvand, A., Golchin, A., Jafari Asl, M., & Amanifar, S. (2026). Synthesis and Evaluation of Enriched Liquid Organic Fertilizers Using Different Iron Sources: Effects on Growth and Yield of Maize (Zea mays L.), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1), 151-167. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404098.670024

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404098.670024

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Calcareous soils constitute over 87% of Iran's agricultural lands and present challenges such as nutrient immobilization due to their alkaline nature and calcium carbonate content. This study aims to investigate the effect of elemental sulfur application at different levels combined with *Thiobacillus* bacteria, under varying moisture conditions on sulfur oxidation and changes in selected chemical properties of five calcareous and non-calcareous soils with varying calcium carbonate contents.

Methods

A randomized complete block design experiment was conducted with three sulfur application rates (0, 500, and 1000 kg/ha) and two moisture levels (40% and 60% saturation). Soil samples were collected from five different regions in Iran with distinct calcium carbonate contents. Samples were incubated in controlled laboratory conditions at 25°C for one year. Parameters measured included soil pH, electrical conductivity (EC), available phosphorus and sulfate, as well as extractable iron and zinc. The sulfur oxidation rate was determined over specified time intervals. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) based on a randomized complete block design, and means were compared using Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

Results

Soil analysis results showed that the calcium carbonate content of these soils ranged from less than 1 to 44 percent and were classified into five categories: non-calcareous (less than 1 percent= Balestan soil), low calcareous (1 to 10 percent= Babol soil), moderately calcareous (10 to 25 percent= Qezelr soil), calcareous (25 to 40 percent= Falard soil), and highly calcareous (40 to 60 percent= Sharifabad soil). The results showed that a moisture content of 40% (optimal) and the application of 500 kg sulfur per hectare led to the highest sulfur oxidation rate. This significant increase in oxidation rate was mainly due to the activity of Thiobacillus bacteria as a biological catalyst in the oxidation process, which accelerated sulfuric acid production under optimal moisture conditions combined with sulfur. Increasing moisture to 60% led to a reduction in the oxidation rate due to oxygen limitation and decreased microbial activity. From a soil reclamation perspective, sulfur application, especially at 1000 kg/ha under 40% moisture conditions, had the greatest impact on reducing pH and EC and increasing the availability of nutrients such as phosphorus, sulfate, iron, and zinc. Among the soils, the largest pH reduction was recorded in Qezelr soil (a decrease of 0.87 units), while Babol soil showed the highest increase in EC (1.19 dS/m) and the highest concentrations of available phosphorus (41.1 mg/kg), sulfate (2690 mg/kg), iron (62.9 mg/kg), and zinc (1.25 mg/kg). In contrast, Sharifabad soil, with a 44% calcium carbonate equivalent content, demonstrated the least sensitivity to sulfur oxidation and subsequent pH changes.

Conclusions

Calcium carbonate acts as a determining factor in sulfur oxidation. In soils with low to moderate calcium carbonate content, sulfur was able to effectively reduce pH and increase the solubility of nutrients, but its effect is limited in highly calcareous soils. Therefore, soils with high buffering capacity and calcium carbonate content require larger amounts of sulfur to observe significant changes in sulfur oxidation and pH. This study demonstrated that the application of paste sulfur produced by the Iranian Research Institute of Petroleum Industry, along with Thiobacillus bacteria under optimal moisture conditions (40% saturation moisture), can serve as a practical and effective strategy for reclaiming calcareous soils with calcium carbonate content below 50%. Therefore, high-quality domestically produced sulfur can be utilized in nutrient management and reclamation programs for alkaline soils in Iran. To transfer the results to field conditions, it is recommended to conduct field experiments in soils with calcium carbonate content greater than 50% to determine the critical sulfur dose and optimal moisture level for each soil texture.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author Contributions

"Conceptualization. J.Gh. and K.Kh.; methodology, J.Gh.; software, K.Kh.; validation, J.Gh., MH.D. and K.Sh.; formal analysis, J.Gh.; investigation, K.Kh.; resources, J.Gh.; data curation, N.M.; writing—original draft preparation, J.Gh. and K.Kh.; writing—review and editing, J.Gh. and K.Kh.; visualization, J.Gh.; supervision, J.Gh. and MH.D.; project administration, J.Gh.; funding acquisition, J.Gh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the author(s) did not use any generative AI or AI-assisted technologies in the writing process. The author(s) are fully responsible for the originality and content of the publication.

Data Availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors express their appreciation to the experts of the Soil and Water Research Institute laboratory, as well as

to the technical team of the Petroleum Industry Research Institute for providing the sulfur prills used in this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and other forms of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

اثر مصرف گوگرد و محتوای رطوبت خاک بر اکسایش گوگرد و ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آهکی

جلال قادری[1]✉، محمد حسین داوودی[2]، ندا محمدی[3]، کریم شهبازی[4] و کمال خلخال[5]

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. رایانامه نویسنده مسئول ghaderijalal@gmail.com

۲. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: davoodi_mh@gmail.com

۳. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی. رایانامه: nmohamadi52@yahoo.com

۴. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: shahbazikarim@yahoo.com

۵. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران. رایانامه: kamalkhalkhal@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶
تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:
اکسایش،
تیوباسیلوس،
خاک آهکی،
رطوبت،
گوگرد

چکیده

خاک‌های آهکی بیش از ۸۷ درصد اراضی کشاورزی ایران را تشکیل می‌دهند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر مقادیر مختلف گوگرد (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) در دو سطح رطوبتی (۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع) بر فرایند اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آهکی و غیرآهکی همراه با باکتری تیوباسیلوس (Thiobacillus) بود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در پنج نوع خاک با درصد آهک متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان اکسایش گوگرد در رطوبت ۴۰ درصد و مقدار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که این امر بهینه‌ترین شرایط برای فعالیت میکروبی اکسیدکننده گوگرد را فراهم می‌آورد. افزایش رطوبت به ۶۰ درصد باعث کاهش سرعت اکسایش ناشی از محدودیت اکسیژن و عملکرد کمتر فعالیت میکروبی شد. در این تحقیق بیشترین کاهش معنی‌دار pH و افزایش هدایت الکتریکی (EC)، غلظت قابل‌جذب فسفر، سولفات، آهن و روی پنج نوع خاک مربوطه به تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و در رطوبت ۴۰ درصد بود. بیشترین کاهش pH در خاک قزلر (۰/۸۷ واحد)، بیشترین افزایش EC در خاک بابل (۱/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر)، و بیشترین غلظت فسفر (۴۱/۱ میلی‌گرم برکیلوگرم)، سولفات (۲۶۹۰ میلی‌گرم برکیلوگرم)، آهن (۶۲/۹ میلی‌گرم برکیلوگرم) و روی (۱/۲۵ میلی‌گرم برکیلوگرم) در خاک بابل ثبت شد. خاک شریف‌آباد با ۴۴ درصد آهک، کمترین تأثیرپذیری را نسبت به اکسایش گوگرد و تغییرات pH داشت. نتایج این مطالعه نشان داد که مصرف گوگرد همراه با رطوبت بهینه می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد برای اصلاح خاک‌های با محتوای آهک کمتر از ۵۰ درصد مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: قادری، جلال؛ داوودی، محمدحسین؛ محمدی، ندا؛ شهبازی، کریم و خلخال، کمال (۱۴۰۴). اثر مصرف گوگرد و محتوای رطوبت خاک بر اکسایش گوگرد و ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آهکی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۱)، ۱۶۷-۱۵۱.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404098.670024

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.404098.670024

مقدمه

وجود کربنات کلسیم و مقدار آن یکی از خصوصیات مهم خاک می‌باشد که اغلب بایستی در زمان تفسیر نتایج برای ارزیابی حاصلخیزی، اصلاح و طبقه‌بندی خاک‌ها مورد توجه قرار گیرد. اکثر خاک‌های ایران متاثر از کربنات کلسیم بوده و بیش از ۸۷ درصد خاک‌های اراضی کشاورزی بیشتر از پنج درصد کربنات کلسیم معادل دارند و حدود ۵۸ درصد خاک‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد کربنات کلسیم معادل دارند (شهبازی و بشارتی، ۱۳۹۲). کانی‌های کربناتی به دلیل حلالیت نسبتا زیاد، واکنش‌پذیری و خاصیت قلیایی، به صورت بافر عمل کرده و بنابراین مقدار pH خاک‌های آهکی در دامنه‌ای بین ۷/۵ تا ۸/۵ قرار دارد. به همین دلیل کربنات‌ها نقش مهمی در فرایندهای خاک‌سازی، واکنش‌های شیمیایی و خصوصیات ریزوسفر در این خاک‌ها بازی می‌کنند. از مهم‌ترین راهکارهای ارائه شده برای کاهش pH موضعی، اصلاح خاک، افزایش حلالیت و رفع کمبود عناصر غذایی در خاک‌های آهکی و قلیایی، استفاده از کودهای اسیدزا مانند گوگرد عنصری و گوگرد پاستیل است که سالانه بیش از دو میلیون تن آن در صنایع نفت و گاز ایران تولید می‌شود و قابل دسترس و مقرون به صرفه است (قادری و همکاران، ۱۳۹۶). برخی منابع گزارش کردند که کوددهی گوگرد به طور مداوم اثرات منفی تنش‌های غیرزیستی مختلف، مانند سمیت فلزات سنگین، تنش شوری، تنش خشکی و غیره را نیز کاهش می‌دهد (Zahid et al., 2024; Wu et al., 2022; Usmani et al., 2020; Lou et al., 2017). اثربخشی گوگرد عنصری بستگی به مقدار اکسایش آن دارد که فرایندی شیمیایی و زیستی است. اکسایش گوگرد از طریق کاهش pH و در پی آن، افزایش حلالیت و جذب عناصری مانند فسفر، آهن و روی باعث افزایش حاصلخیزی خاک نیز می‌شود (Zhao et al., 2015; Tiwari and Gupta, 2006). علاوه بر این، اکسایش گوگرد با تشکیل SO_4^{2-}، خاک‌های قلیایی را احیا می‌کند. میکروارگانیسم‌های مهمی که در اکسایش گوگرد نقش دارند، گروهی از باکتری‌های متعلق به جنس اسیدیتیو باسیلوس، تیوباسیلوس و باکتری‌های هتروتروف شامل سیتو باسیلوس فیرموس، انتروباکتر کلوآکه، انتروباکتر لودویگی، کلبسیلا اکسی‌توکا، فیتوباکتر دیازوتروفیکوس و سودوموناس استوتزری هستند (Williams and Kelly, 2013, Chaudhary, 2018, Shinde et al., 2022). اکسایش گوگرد در خاک‌های آهکی تحت تأثیر عوامل متعددی مانند اندازه گوگرد، رطوبت خاک، درجه حرارت، pH، مقدار عناصر غذایی، فعالیت‌های میکروبی و جمعیت ریزجانداران در خاک قرار می‌گیرد (Janzen and Bethany, 1987). اکسایش زیستی گوگرد، سبب تولید اسید سولفوریک می‌شود که باعث کاهش pH خاک و حل شدن کربنات کلسیم و ایجاد شرایط مناسب برای افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی توسط گیاهان، رشد و عملکرد آن‌ها می‌شود (Abdou, 2011). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر اکسایش گوگرد، رطوبت خاک است (Janzen and Bethany, 1987؛ Watkinson and Blair, 1993). با این حال، چگونگی تعامل آب خاک و کربنات کلسیم خاک برای تأثیرگذاری بر جوامع میکروبی اکسیدکننده گوگرد و اکسایش گوگرد مشخص نیست. میزان آب خاک نیز یک متغیر حیاتی برای اکسایش زیستی گوگرد است. هنگامی که میزان آب خاک کم است، به دلیل کمبود آب و مواد زیرین، از رشد میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده گوگرد جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، لایه‌های نازک آب حرکت باکتری‌ها را محدود می‌کنند و باکتری‌ها نمی‌توانند به سطح ذرات گوگرد دسترسی پیدا کنند (Zhao et al., 2022). هنگامی که میزان آب خاک زیاد است، به دلیل انتشار بسیار کندتر اکسیژن در آب نسبت به هوا، در دسترس بودن اکسیژن به یک عامل محدودکننده تبدیل می‌شود (Zhao et al., 2022). Wainwright et al. (1986) گزارش کردند که مناسب‌ترین شرایط رطوبتی برای اکسایش گوگرد، ظرفیت زراعی است. Zhao et al. (2022) گزارش کردند سرعت اکسایش با افزایش میزان آب (۴۰ به ۶۰ درصد رطوبت) افزایش یافت. قادری و همکاران (۱۳۹۶) با بررسی دو نوع خاک گزارش کردند که با کاربرد ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ کیلوگرم گوگرد برهکتار در شرایط مختلف رطوبتی (۴۰ و ۶۰ درصد)، pH خاک کاهش، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت فسفر، آهن، روی قابل‌جذب و سولفات محلول خاک افزایش و بین تیمارهای مختلف، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ($p < 0.01$) مشاهده شد. آنان همچنین بیان کردند که بیش‌ترین مقدار کاهش pH، افزایش EC، آهن و روی قابل‌جذب و سولفات محلول خاک با کاربرد ۱۰۰۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار بود. Jaggi et al. (2005) تأثیر کاربرد گوگرد عنصری را در سه رژیم رطوبتی مختلف (۴۰، ۶۰ و ۱۲۰ درصد) و سه رژیم دمایی متفاوت (۱۲، ۲۴ و ۳۶ درجه سانتی‌گراد) بر تغییرات pH و قابلیت دسترسی فسفر در سه نوع خاک، اسیدی، خنثی و قلیایی بررسی و گزارش کردند که اکسیداسیون گوگرد، باعث کاهش pH خاک قلیایی و افزایش غلظت فسفر قابل‌جذب شد و بیش‌ترین مقدار آن در شرایط رطوبتی ۶۰ درصد بدست آمد. Hashemimajd et al. (2012) گزارش کردند که با کاربرد گوگرد در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی، بیش‌ترین مقدار کاهش pH خاک در ۲۸ روز انکوباسیون بود و سپس به‌علت خاصیت بافری خاک، مجدداً افزایش یافت. همانطوری‌که اشاره شد اثربخشی گوگرد بستگی به اکسید شدن آن به اسید سولفوریک دارد و آگاهی از چگونگی اکسیداسیون آن در خاک‌های آهکی و عوامل موثر بر آن، می‌تواند اولین گام برای بکارگیری این ماده در زمینه اصلاح خاک، کاهش pH و تغذیه گیاهی باشد (بشارتی، ۱۳۹۵). با توجه به تحقیقات محدود درباره تاثیر شرایط رطوبتی مختلف بر

اکسایش گوگرد در کشور ما و با عنایت به اینکه گوگرد گرانوله با فرایند خاصی توسط پژوهشگاه صنعت نفت تولید و بلافاصله با جذب رطوبت باز شده و مشکلات مربوط به کودهای گوگرد گرانوله‌ای قبلی را ندارد، این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسایش گوگرد و برخی از خصوصیات شیمیایی پنج نوع خاک آهکی و غیر آهکی به‌مدت یک سال، در درجه حرارت ثابت ۲۵ سانتی‌گراد انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به تدوین دستورالعمل‌های بومی مصرف گوگرد در شرایط رطوبتی متغیر ایران کمک کند.

مواد و روش‌ها

دراین پژوهش تأثیر دو سطح رطوبتی (۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع) و سه سطح گوگرد (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار) از منبع گوگرد تولیدی پژوهشگاه صنعت نفت به همراه باکتری تیوباسیلوس، در سه تکرار و به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بر پنج نوع خاک با درصد آهک متفاوت به مدت یک سال (۱۳۹۹-۱۳۹۸) و در درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد در اتاقک انکوباتور آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب[1] بررسی شد. این خاک‌ها از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شدند (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مناطق مورد آزمایش

استان	منطقه	سری خاک	کربنات کلسیم معادل (٪)	دسته‌بندی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
آذربایجان شرقی	منطقه هشترود	بالستان	۰/۹۶	غیر آهکی (کمتر از ۱ ٪)	۳۷° ۴۶′ ۴۸″	۴۶° ۴۲′ ۳۶″
مازندران	غرب استان مازندران	بابل	۳/۱	کم آهک (۱۰-۱٪)	۶۲° ۲۵′ ۵۵″	۴۰° ۴۵′ ۷۵,۵″
گلستان	سد حبیب ایشان	قزلر	۱۳/۵	نسبتاً آهکی (۲۵-۱۰٪)	۳۷° ۰۷′ ۳۱″	۵۴° ۲۴′ ۳۹″
چهارمحال و بختیاری	دشت فلارد	فلارد	۳۳/۱	آهکی (۴۰-۲۵٪)	۳۱° ۱۷′ ۲۰″	۵۱° ۱۳′ ۲۰″
کرمانشاه	منطقه سنقر	شریف‌آباد	۴۳/۶	خیلی آهکی (۶۰-۴۰٪)	۳۴° ۴۳′ ۴۵″	۴۷° ۳۱′ ۳۲″

نمونه‌های خاک از عمق صفر الی ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شده، پس از آماده‌سازی، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در آزمایشگاه تعیین شد. برای تجزیه نمونه‌های خاک، بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، درصد رطوبت اشباع نسبی، pH و EC در عصاره ۱:۲/۵ (شهبازی و همکاران، ۱۴۰۳)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش سه مرحله‌ای (Bawer et al., 1952)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون با اسید (Allison & Moodie, 1965)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996)، نیتروژن کل به روش کجلدال (TN) (Bremner, 1996)، فسفر قابل‌جذب به روش بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار (Olsen, 1954)، پتاسیم قابل‌جذب با عصاره‌گیر استات آمونیوم (Knudsen et al., 1982)، آهن، روی، منگنز و مس قابل‌جذب خاک با عصاره‌گیر DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)، سولفات قابل‌جذب با استفاده از روش Chesnin and Yien (1951) اندازه‌گیری و به صورت جدول ۲ ارایه شدند.

جدول ۲. نتایج تجزیه خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاک‌های مورد آزمایش (۳۰-۰ سانتیمتری)

خصوصیات	واحد	بالستان	بابل	قزلر	فلارد	شریف‌آباد
درصد اشباع	٪	۲۸	۶۳	۴۲	۴۷	۴۱
pH		۷/۵	۷/۶	۸/۲۵	۷/۹۱	۷/۸
EC	dS/m	۰/۱۵	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۳	۰/۲۳
کربن آلی	٪	۰/۶۸	۱/۸۱	۱/۱۷	۱/۱۶	۰/۸۷
CEC	meq/100g	۱۳/۶	۳۴	۱۳/۲	۲۴/۶	۲۳
بافت		Sandy Loam	Clay	Silty Clay	Silty Clay	Silty Clay Loam
فسفر	$mg.kg^{-1}$	۷/۳	۳۶/۴	۷	۵/۴	۱۵/۴
گوگرد	$mg.kg^{-1}$	۴/۲۵	۱۶/۵	۷/۵	۸/۶۲	۱/۷۵
آهن	$mg.kg^{-1}$	۴/۶	۶۰/۲	۷/۶	۴/۵	۶/۱
روی	$mg.kg^{-1}$	۰/۴	۰/۹۵	۱	۰/۳	۰/۴

[1] Soil and Water Research Institute

اجرای آزمایش و اندازه‌گیری‌های مربوط به آن

برای انجام آزمایش، ابتدا مقدار ۸۰۰ گرم خاک هوا خشک در داخل ظرف‌های پلاستیکی ۱۵۰۰ میلی‌لیتری (ارتفاع تقریبی ۱۵ سانتیمتر، قطر دهانه حدود ۱۲ سانتیمتر) ریخته شد. سپس نسبت به اعمال تیمارهای کودی همراه با باکتری تیوباسیلوس اقدام شد. تعداد کل گلدان‌ها با احتساب تمامی تیمارها و تکرارها به شرح زیر محاسبه گردید:

گلدان ۹۰ = (تکرار) ۳ × (سطح رطوبت) ۲ × (سطح گوگرد) ۳ × (خاک) ۵

در این آزمایش به ازای هر ۵۰ کیلوگرم کود گوگرد مصرفی، یک کیلوگرم باکتری تیوباسیلوس از گونه *T. neapolitanous* استفاده شد. مقادیر گوگرد مصرفی با فرض وزن یک هکتار، سه میلیون کیلوگرم محاسبه و مقدار یکنواخت ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست به تمامی تیمارها (شامل تیمار شاهد) اضافه شد تا به عنوان منبع پایه کربن و انرژی برای جمعیت باکتریایی در تمام واحدهای آزمایشی عمل کرده و اثرات احتمالی ناشی از تفاوت در حاصلخیزی اولیه خاک را خنثی نماید. نتایج تجزیه ورمی‌کمپوست در جدول ۳ نشان داده شده است. گوگرد تهیه شده از پژوهشگاه صنعت نفت تأمین شد. گوگرد پاستیل، یک نوع کود گوگردی گرانوله به رنگ سبز متمایل به زرد می‌باشد که دارای ۱۲ درصد رس بنتونیت و ۸۸ درصد گوگرد است. با استفاده از پیپت فاین جت، آب مقطر به نمونه‌های خاک اضافه تا به رطوبت مورد نظر براساس تیمارهای رطوبتی۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع برسند. بر روی گلدان‌ها برای جلوگیری از تبخیر و در عین حال امکان تبادل گازی با پارافیلم پوشانده و چند سوراخ کوچک برای تهویه ایجاد شد. سپس ظرف‌ها در دمای مورد نظر در انکوباتور نگهداری شدند. کنترل رطوبت به‌وسیله روش وزنی و در فواصل ۴۸ الی ۷۲ ساعت انجام شد. در پایان هر دوره نگهداری شده، خاک‌ها از ظرف‌ها برداشته، خوب مخلوط شده و برای تجزیه‌های مختلف استفاده شد. pH و EC خاک در نسبت خاک به آب ۱:۲/۵ (W/V)، در زمان‌های صفر، ۳، ۷، ۱۵، ۲۵، ۴۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ روز، غلظت فسفر، آهن و روی قابل استفاده در زمان‌های صفر، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۳۶۰ روز با روش‌های مذکور اندازه‌گیری شدند. غلظت سولفات قابل استفاده در زمان‌های صفر، ۲۵، ۶۰ و ۳۶۰ روز به‌وسیله روش توربیدومتری (Chesnin & Yien, 1951) و میزان اکسایش گوگرد، در زمان‌های ۲۵، ۶۰ و ۳۶۰ روز بوسیله معادله Janzen and Bettany (1987)، طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

رابطهٔ ۱) $K= (1-(1-m/m_o)^{1/3})z\ Do/2t$

K: میزان اکسیداسیون (میکروگرم گوگرد در سانتی‌متر مربع در روز).

m: جرم (میکروگرم) گوگرد اکسید شده (از طریق افزایش غلظت گوگرد قابل عصاره‌گیری با ۰/۱۵ درصد کلرور کلسیم در خاک تیمار شده نسبت به تیمار نشده در همان زمان محاسبه شد).

m_o: جرم گوگرد (میکروگرم) در زمان اولیه هر دوره نگهداری در انکوباتور.

Z: چگالی گوگرد ($2.07\times 10^6\ \mu g\ Cm^{-3}$).

t: زمان نگهداری در انکوباتور (روز).

Do: قطر ذرات گوگرد در شروع هر دوره نگهداری در انکوباتور (۰/۷۵میلی‌متر در نظر گرفته شد).

جدول ۳. برخی خصوصیات شیمیایی کود ورمی‌کمپوست مورد استفاده

pH	هدایت الکتریکی	رطوبت	نیتروژن کل	کربن آلی	فسفر کل بر حسب P_2O_5	پتاسیم کل برحسب K_2O	آهن	روی	گوگرد محلول	گوگرد کل	سرب	کادمیم
	dS/m	%	%	%	%	%	mg/kg	mg/kg	%	%	mg/kg	mg/kg
۷/۵۴	۱۷/۵۸	۷/۲۹	۱/۵۵	۲۴/۸۸	۱/۳۷	۰/۲۴	۱۱۹۷۸	۲۳۹	۰/۰۸۹	۰/۶۷	۴۴/۵	۳

برای انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار آماری MSTAT-C استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال یک درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک‌های مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. آهک این خاک‌ها در محدوه کمتر از ۱ تا ۴۴ درصد بوده و در

پنج دسته غیر آهکی (کمتر از ۱ درصد)، کم آهک (۱ تا ۱۰ درصد)، نسبتاً آهکی (۱۰ تا ۲۵ درصد)، آهکی (۲۵ تا ۴۰ درصد) و خیلی آهکی (۴۰ تا ۶۰ درصد) تقسیم بندی شدند. با توجه به اینکه هدایت الکتریکی این خاک‌ها کمتر از ۱ است (جدول ۲)، بنابراین شوری به عنوان یک عامل مهم و تأثیرگذار در اکسایش گوگرد، در شرایط بهینه قرار دارد. شوری بالا با ایجاد استرس اسمزی و سمیت یونی می‌تواند باعث کاهش رشد و فعالیت جمعیت‌های میکروبی، از جمله باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (مانند تیوباسیلوس) شود (Zhao et al., 2022; Germida & Janzen, 1993). همانطور از pH خاک‌های آهکی انتظار می‌رفت این pH در محدوده ۷/۵ تا ۸/۵ قرار دارد (جدول ۲).

تأثیر مقدار گوگرد در شرایط رطوبتی بر اکسایش گوگرد در زمان‌های مختلف انکوباسیون خاک

اکسایش گوگرد فرایند تشکیل SO_4^{2-} با اکسایش S°، H_2S و سولفید (S^{2-}) توسط برخی از ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد است (Chaudhary et al., 2023). در فرایند اکسایش زیستی گوگرد، آنزیم‌های کلیدی شامل سولفور اکسیداز، تیوسولفات اکسیداز و تتراتیونات اکسیداز نقش دارند که به‌ترتیب کاتالیزگر تبدیل گوگرد به تیوسولفات ($S_2O_3^{2-}$)، تیوسولفات به تتراتیونات ($S_4O_6^{2-}$) و در نهایت تتراتیونات به سولفات (SO_4^{2-}) هستند (رابطه ۲). این آنزیم‌ها عمدتاً در باکتری‌های اختصاصی مانند *Thiobacillus spp.*، *Acidithiobacillus spp.* و برخی گونه‌های *Paracoccus* و *Pseudomonas* شناسایی شده‌اند و فعالیت آن‌ها وابسته به pH پایین و حضور اکسیژن مولکولی است (Chaudhary et al., 2023).

$$S \rightarrow S_2O_2^{3-} \rightarrow S_4O_2^{6-} \rightarrow SO_4^{2-}$$ رابطه ۲)

نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک‌های مورد آزمایش با افزایش مصرف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی، مقدار اکسایش کاهش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار اکسایش گوگرد خاک اختلاف معنی‌داری وجود داشت ($p < 0.05$). بیش‌ترین مقدار اکسایش با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در شرایط ۴۰ درصد رطوبت اشباع بدست آمد (جدول ۴). مصرف زیاد گوگرد (۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) باعث کاهش فعالیت میکروبی یا تجمع ترکیبات بازدارنده شد که ممکن است از طریق چندین مکانیسم بازدارنده در سطوح زیاد گوگرد باشد. اولاً، تجمع سریع اسید سولفوریک و متعاقب آن کاهش شدید pH موضعی در اطراف ذرات گوگرد (رابطه ۳) می‌تواند به طور مستقیم برای جمعیت باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد سمی باشد و فعالیت متابولیک آنها را مهار کند (Germida & Janzen, 1993).

$$S(s)+\frac{3}{2}O2(g)+H2O(l)\rightarrow H2SO4(aq)$$ رابطهٔ ۳)

ثانیاً، افزایش غلظت یون‌های سولفات و دیگر املاح محلول می‌تواند با ایجاد تنش اسمزی، فشار مضاعفی بر میکروارگانیسم‌ها وارد آورد. ثالثاً، در سطوح بسیار زیاد گوگرد، امکان تشکیل لایه‌ای از مواد حدواسط اکسایش (مانند تیوسولفات) بر سطح ذرات گوگرد وجود دارد که این لایه به‌عنوان یک سد فیزیکی از تماس مستقیم باکتری‌ها با سوبسترای اصلی (S^0) جلوگیری می‌کند و از این طریق نرخ اکسایش را محدود می‌سازد (Janzen & Bettany, 1987). این یافته که اکسایش در سطوح زیاد به نقطه اشباع می‌رسد یا کاهش می‌یابد، با مشاهدات گزارش شده در مطالعات قبلی همسو است (قادری و همکاران، ۱۳۹۶؛ Modaihsh et al., 1989) و تأکیدی است بر این مفهوم که کاربرد گوگرد برای دستیابی به حداکثر کارایی، غلظت بهینه دارد و مصرف بی‌رویه آن می‌تواند نتایج معکوس به همراه داشته باشد. اکسایش در روز ۲۵ انکوباسیون به دلیل فعالیت میکروبی زیاد در مراحل اولیه تجزیه گوگرد به اوج می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. پس از ۳۶۰ روز، میزان اکسایش به کمترین سطح می‌رسد، زیرا بیشتر گوگرد اکسید شده است. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار اکسایش به‌ترتیب در خاک آهکی شریف‌آباد و خاک غیر آهکی بالستان به مقدار ۲۲/۴ و ۸۸/۷ میکروگرم گوگرد بر سانتی مترمربع در روز ۲۵ انکوباسیون بدست آمد (جدول ۴). در خاک‌های با محتوای بالای کربنات کلسیم (مانند فلارد و شریف‌آباد)، ظرفیت بافری قوی باعث خنثی‌سازی سریع اسید سولفوریک تولیدشده از اکسایش گوگرد می‌شود. این امر مانع از کاهش پایدار pH و ایجاد شرایط مطلوب برای فعالیت میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده مانند تیوباسیلوس می‌گردد. همچنین، رسوب گچ (رابطه ۴) بر سطح ذرات گوگرد به‌عنوان یک سد فیزیکی عمل کرده و از تماس باکتری‌ها با سوبسترا جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، نوسانات سریع pH باعث اتلاف انرژی میکروبی برای سازگاری با شرایط متغیر شده و در نهایت منجر به کاهش سرعت و بازده فرآیند اکسایش گوگرد در این خاک‌ها می‌شود. بنابراین، برای دستیابی به نتایج مطلوب در خاک‌های با کربنات کلسیم زیاد، ممکن است نیاز به مصرف مقادیر بیشتر گوگرد یا ترکیب آن با مواد آلی باشد. خاک بابل با وجود مقدار زیاد کربن آلی (۱/۸۱ درصد)، اکسایش متوسطی نشان داد، که احتمالاً به دلیل رطوبت اشباع بیشتر (۶۳ درصد رطوبت اشباع) است. در این تحقیق با افزایش کاربرد گوگرد در تیمارهای آزمایشی در شرایط مختلف رطوبتی (۴۰ و ۶۰

درصد رطوبت اشباع)، مشاهده شد، مقدار اکسایش گوگرد کاهش یافت که این نتیجه با نتایج Janzen & Bettany (1987) سازگار بود. با افزایش رطوبت خاک خشک تا ۴۰ درصد، اکسیداسیون گوگرد افزایش یافته و به حد مطلوب می‌رسد، سپس با افزایش مجدد رطوبت تا ۶۰ درصد به‌دلیل کاهش اکسیژن در منافذ خاک، از سرعت اکسایش گوگرد کاسته می‌شود.(Janzen & Bettany (1987 گزارش کردند که در رطوبت‌های کم‌تر از ظرفیت زراعی به‌دلیل محدودیت آب برای ریزجانداران اکسیدکننده و در رطوبت‌های بیشتر به‌واسطه کمی اکسیژن در خاک، اکسیداسیون گوگرد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آهک به تنهایی بر اکسایش و باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد تأثیرگذار نیست، بلکه همراه با دیگر خصوصیات خاک مانند شوری (از طریق سمیت)، ماده آلی (منبع انرژی برای میکروارگانیسم‌ها)، بافت و رطوبت (تهویه و تبادل گازی) به‌صورت تعاملی بر اکسایش زیستی گوگرد در خاک تأثیر میگذارند.

جدول ۴. مقایسه میانگین تأثیر مقدار گوگرد در شرایط رطوبتی بر نرخ اکسایش گوگرد خاک‌های مورد آزمایش در زمان‌های مختلف انکوباسیون خاک

(میکروگرم گوگرد بر سانتی مربع در روز)

سری خاک	گوگرد مصرفی (کیلوگرم درهکتار)	رطوبت اشباع (درصد)	۲۵روز *	۶۰ روز *	۳۶۰ روز
بالستان	۵۰۰	۴۰	۸۸/۷ a	۴۶/۱ a	۹/۱ a
		۶۰	۷۰/۵ b	۳۳/۶ b	۷ a
	۱۰۰۰	۴۰	۶۶/۸ b	۳۱/۸ bc	۶/۶ a
		۶۰	۵۴/۸ b	۲۳/۸۳ c	۵/۷ a
بابل	۵۰۰	۴۰	۶۹/۹ a	۳۳/۹ a	۶/۷ a
		۶۰	۶۴/۲ a	۱۴/۱ b	۳/۲ c
	۱۰۰۰	۴۰	۶۸/۸ a	۳۳/۳ a	۶/۴ b
		۶۰	۲۷ b	۱۲/۸ c	۲/۶ d
قزلر	۵۰۰	۴۰	۸۹ a	۴۲ a	۷ a
		۶۰	۸۰ b	۳۶ b	۶/۶ b
	۱۰۰۰	۴۰	۶۸ c	۳۲ b	۶ b
		۶۰	۵۲ d	۲۴ c	۴ c
فلارد	۵۰۰	۴۰	۳۳/۴ a	۲۲/۸ a	۲/۶ a
		۶۰	۲۹/۹ b	۱۶/۶ c	۱/۸ b
	۱۰۰۰	۴۰	۳۰/۱ b	۱۷ b	۱/۸ b
		۶۰	۲۳ c	۱۱/۳ d	۱/۵ c
شریف آباد	۵۰۰	۴۰	۲۲/۸ a	۱۳/۸ a	۱/۸ a
		۶۰	۱۹/۳ c	۱۱/۲ c	۱/۵ b
	۱۰۰۰	۴۰	۲۱/۸ b	۱۲/۵ b	۱/۸ a
		۶۰	۱۶/۴ d	۱۰/۹ c	۱/۴ c

* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر pH خاک

نتایج نشان داد با افزایش سطوح گوگرد مصرفی (به ویژه ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، pH خاک در پنج سری خاک مذکور کاهش یافت (جدول ۵). بیشترین کاهش pH به ترتیب در خاک‌های قزلر (۰/۸۷ واحد)، بالستان (۰/۶ واحد)، فلارد (۰/۶ واحد)، بابل (۰/۵ واحد) و شریف‌آباد (۰/۴۲ واحد) ثبت شد. بنابراین خاک‌های با درصد آهک زیاد ۴۰ درصد (شریف آباد) دارای کمترین کاهش pH بوده و همچنین این نوع خاک زودتر از بقیه خاک‌ها و بعد از ۶۰ روز به دلیل خاصیت بافری خاک مجدداً شروع به افزایش pH کردند. مکانیسم احتمالی این بازگشت pH می‌تواند شامل مصرف تدریجی اسید سولفوریک تولید شده در واکنش با اجزای بافری خاک، به ویژه کربنات‌های کلسیم (آهک) باشد. واکنش‌های خنثی‌سازی زیر (رابطه ۴ و ۵) می‌توانند دلیل این پدیده باشند:

رابطهٔ ۴) $CaCO_3(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow CaSO_4(s) + H_2CO_3(aq)$

رابطهٔ ۵) $H_2\ CO_3\ (aq) \rightleftharpoons H_2\ O(l) + CO_2\ (g)$

در این واکنش‌ها، اسید سولفوریک قوی (H_2SO_4) با کربنات کلسیم ($CaCO_3$) که یک جزء بافری اصلی در خاک‌های آهکی ایران است، واکنش داده و به اسید کربنیک ضعیف‌تر (H_2CO_3) و گچ ($CaSO_4$) تبدیل می‌شود. اسید کربنیک نیز به نوبه خود به آب و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شود که از خاک فرار می‌کند. در نتیجه، یون هیدروژن (H^+) از سیستم حذف شده و pH افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مواد

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر pH خاک‌های مورد آزمایش

گوگرد (kg/ha)	رطوبت اشباع (٪)	۳ روز	۷ روز	۱۵ روز	۲۵ روز	۴۰ روز	۶۰ روز	۱۲۰ روز	۱۸۰ روز	۲۷۰ روز	۳۶۰ روز
		بالستان									
۰	۴۰	۷/۵۰ ab	۷/۴۹ ab	۷/۴۸ a	۷/۴۶ ab	۷/۴۵ a	۷/۴۴ a	۷/۴۴ a	۷/۴۴ a	۷/۴۳ a	۷/۴۲ a
	۶۰	۷/۵۵ a	۷/۵۱ a	۷/۵۰ a	۷/۴۹ a	۷/۴۸ a	۷/۴۷ a	۷/۴۷ a	۷/۴۶ a	۷/۴۶ a	۷/۴۵ a
۵۰۰	۴۰	۷/۴۹ ab	۷/۴۵ ab	۷/۴۲ abc	۷/۳۹ bc	۷/۳۴ bc	۷/۲۶ bc	۷/۱۸ bc	۷/۱۲ bc	۷/۰۷ bc	۷ bc
	۶۰	۷/۵۰ ab	۷/۴۸ ab	۷/۴۶ ab	۷/۴۴ ab	۷/۴۰ ab	۷/۳۳ b	۷/۲۵ b	۷/۲۰ b	۷/۱۴ b	۷/۰۸ b
۱۰۰۰	۴۰	۷/۴۸ b	۷/۴۳ bc	۷/۳۹ bc	۷/۳۴ cd	۷/۲۹ c	۷/۲۰ c	۷/۱۲ c	۷/۰۴c	۶/۹۸ d	۶/۹۰ d
	۶۰	۷/۵۰ ab	۷/۴۷ ab	۷/۴۳ abc	۷/۴۰ bc	۷/۳۶ bc	۷/۲۹ b	۷/۲۲ b	۷/۱۲ bc	۷/۰۵ cd	۶/۹۹ c
		بابل									
۰	۴۰	۷/۶۰ ab	۷/۶۰ ab	۷/۵۸ ab	۷/۵۸ ab	۷/۵۷ ab	۷/۵۶ a	۷/۵۵ b	۷/۵۵ ab	۷/۵۶b	۷/۵۸ a
	۶۰	۷/۶۴ a	۷/۶۳ a	۷/۶۳ a	۷/۶۲ a	۷/۶۲ a	۷/۶۱ a	۷/۶۱ a	۷/۶۲ a	۷/۶۳ a	۷/۶۳ a
۵۰۰	۴۰	۷/۵۹ ab	۷/۵۷ ab	۷/۵۵abc	۷/۵۲ bcd	۷/۴۷ cde	۷/۴۲ b	۷/۳۶ cd	۷/۳۱ abc	۷/۳۳d	۷/۳۷ bc
	۶۰	۷/۶۳ ab	۷/۶۲ a	۷/۵۹ ab	۷/۵۶ abc	۷/۵۳ bc	۷/۴۸ b	۷/۴۱ c	۷/۳۷ abc	۷/۳۹ c	۷/۴۲ b
۱۰۰۰	۴۰	۷/۵۷ ab	۷/۵۵ ab	۷/۵۲ bc	۷/۴۸ cde	۷/۴۰ de	۷/۳۴ c	۷/۲۱ e	۷/۱۰ cd	۷/۱۲ f	۷/۲۵ d
	۶۰	۷/۶۲ ab	۷/۵۹ ab	۷/۵۸ ab	۷/۵۴abcd	۷/۴۸ cd	۷/۴۳ b	۷/۳۲ d	۷/۲۱ bcd	۷/۲۵ e	۷/۳۴ c
		قزلر									
۰	۴۰	۸/۲۷ ab	۸/۲۶ a	۸/۲۴ab	۸/۲۲ a	۸/۲۱ a	۸/۱۹ a	۸/۱۸ a	۸/۱۷ a	۸/۱۹ a	۸/۲۴ a
	۶۰	۸/۲۹ a	۸/۲۸a	۸/۲۶ a	۸/۲۴ a	۸/۲۴ a	۸/۲۲ a	۸/۲۱ a	۸/۲۱ a	۸/۲۳ a	۸/۲۷ a
۵۰۰	۴۰	۸/ ۲۴abc	۸/۲۲abc	۸/۱۸bc	۸/۱۳ b	۸/۰۵ c	۷/۹۶ c	۷/۸۴ c	۷/۷۴ c	۷/۷۱ c	۷/۹۱ c
	۶۰	۸/۲۷ ab	۸/۲۵ a	۸/۲۲ab	۸/۱۸ab	۸/۱۲ d	۸/۰۵ b	۷/۹۴ b	۷/۸۳ b	۷/۸۰ b	۸/۰۴ b
۱۰۰۰	۴۰	۸/۲۱ ab	۸/۱۶ bc	۸/۰۴ d	۷/۹۱ d	۷/۸۳ e	۷/۷۴ e	۷/۶۷ e	۷/۵۹ d	۷/۴۹ e	۷/۷۲ e
	۶۰	۸/۲۵ bc	۸/۲۲ ab	۸/۱۲ c	۸/۰۲ c	۷/۹۱ d	۷/۸۵ d	۷/۷۷ d	۷/۷۰ c	۷/۶۳ d	۷/۸۱ d
		فلارد									
۰	۴۰	۸/۰۳ ab	۸/۰۲ab	۸ a	۷/۹۸a	۷/۹۵ a	۷/۹۳a	۷/۹۲ a	۷/۹۱ a	۷/۹۴ a	۷/۹۷ b
	۶۰	۸/۰۶ a	۸/۰۵ a	۸/۰۳ a	۸ a	۷/۹۹ a	۷/۹۷a	۷/۹۵ a	۷/۹۴ a	۷/۹۷ a	۸/۰۳ a
۵۰۰	۴۰	۸/۰۲ abc	۷/۹۸bc	۷/۸۷cd	۷/۸۳c	۷/۷۹bc	۷/۷۲c	۷/۶۰ c	۷/۶۳ c	۷/۷۷ c	۷/۹۰cd
	۶۰	۸/۰۴ ab	۸/۰۱ab	۷/۹۳ b	۷/۸۹b	۷/۸۴ b	۷/۷۸b	۷/۶۸ b	۷/۷۳ b	۷/۸۷ b	۷/۹۵bc
۱۰۰۰	۴۰	۷/۹۹ bc	۷/۹۴cd	۷/۸۱ e	۷/۷۵d	۷/۶۶ d	۷/۵۷e	۷/۴۳ e	۷/۴۸ e	۷/۶۲ e	۷/۷۶ e
	۶۰	۸/۰۱ abc	۷/۹۷bc	۷/۸۸bc	۷/۸۱ c	۷/۷۴ c	۷/۶۵d	۷/۵۲ d	۷/۵۷ d	۷/۷۰ d	۷/۸۶ d
		شریف آباد									
۰	۴۰	۷/۸۳ abc	۷/۸۲abc	۷/۸۱ ab	۷/۷۹ ab	۷/۷۹ a	۷/۷۷ a	۷/۷۶ a	۷/۷۵ a	۷/۷۷ ab	۷/۸۱ a
	۶۰	۷/۸۷ a	۷/۸۷ a	۷/۸۵ a	۷/۸۴ a	۷/۸۳ a	۷/۸۲ a	۷/۸۱ a	۷/۸۰ a	۷/۸۲ a	۷/۸۵ a
۵۰۰	۴۰	۷/۸۲ abc	۷/۸۱ bcd	۷/۷۷ bc	۷/۷۱ c	۷/۶۴ f	۷/۵۶ c	۷/۴۷ c	۷/۵۶ c	۷/۶۵ c	۷/۷۶b
	۶۰	۷/۸۷ ab	۷/۸۵ ab	۷/۸۲ ab	۷/۷۸ b	۷/۷۰b	۷/۶۵b	۷/۵۵ b	۷/۶۵ b	۷/۷۴ b	۷/۸۲ a
۱۰۰۰	۴۰	۷/۸۱ bc	۷/۷۸ cd	۷/۷۲ cd	۷/۶۳ d	۷/۵۴d	۷/۴۱ e	۷/۴۱ e	۷/۴۲ d	۷/۵۴ d	۷/۷۰ c
	۶۰	۷/۸۵ abc	۷/۸۲ abc	۷/۷۸ b	۷/۷۲ c	۷/۶۱ c	۷/۵۰d	۷/۴۰ d	۷/۵۲ c	۷/۶۳ c	۷/۷۵b

* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

آلی، اکسیدها و سیلیکات‌های خاک نیز می‌توانند در این ظرفیت بافری نقش داشته باشند. این فرایندها در نهایت منجر به خنثی‌سازی اسید تولید شده و بازگشت تدریجی pH به سطوح اولیه می‌شوند که بر کوتاه مدت بودن اثر اصلاح گوگردی در صورت عدم مصرف مداوم آن تأکید دارد. سیستم کربناتی خاک (شامل کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها) به دلیل داشتن ظرفیت خنثی‌سازی قابل توجه، به عنوان یک بافر طبیعی عمل کرده و از کاهش شدید pH ناشی از اکسایش گوگرد جلوگیری می‌نماید. این ویژگی باعث می‌شود که خاک‌های آهکی در مقایسه با خاک‌های غیر آهکی، کاهش pH کمتری را تجربه کنند. همانند نتایج قادری و همکاران (۱۳۹۶) در این تحقیق نیز بیشترین کاهش pH در تمام خاکها مربوطه به تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و در رطوبت ۴۰ درصد بود. در این تحقیق مشخص شد که با افزایش درصد رطوبت بیش‌تر از ۴۰ درصد (تقریباً معادل شرایط ظرفیت زراعی)، به‌علت محدودیت تهویه (کمی اکسیژن در خاک) و کاهش فعالیت ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد، مقدار کاهش pH خاک کم‌تر بود که نتایج اندازه‌گیری در مورد تغییرات pH خاک درطول

جدول۶. مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌های مورد آزمایش

گوگرد	رطوبت	بالستان									
(kg/ha)	اشباع(٪)	۳ روز	۷ روز	۱۵ روز	۲۵ روز	۴۰ روز	۶۰ روز	۱۲۰ روز	۱۸۰ روز	۲۷۰ روز	۳۶۰ روز
۰	۴۰	۰/۰۹ bc	۰/۰۹۷ cd	۰/۱۲ cd	۰/۱۳ e	۰/۱۵ e	۰/۱۶ f	۰/۱۷ f	۰/۱۸ f	۰/۲۰g	۰/۲۱ f
	۶۰	۰/۰۴ c	۰/۰۶۰ d	۰/۰۸ d	۰/۰۹ e	۰/۱۰ e	۰/۱۱ f	۰/۱۲ f	۰/۱۳ f	۰/۱۵ g	۰/۱۶ f
۵۰۰	۴۰	۰/۱۲ bc	۰/۱۳ cd	۰/۱۸ c	۰/۲۹ c	۰/۳۶ c	۰/۴۴ d	۰/۴۸ d	۰/۵۶ d	۰/۶۱ d	۰/۶۲ d
	۶۰	۰/۱۱ bc	۰/۱۲ cd	۰/۱۳ cd	۰/۲۱ d	۰/۲۵ d	۰/۳۲ e	۰/۳۵e	۰/۳۷ e	۰/۴۳ f	۰/۴۵ e
۱۰۰۰	۴۰	۰/۱۵ b	۰/۲۳ b	۰/۲۸ b	۰/۴۶ b	۰/۵۳ b	۰/۶۰ c	۰/۶۷ c	۰/۷۴ c	۰/۷۷ c	۰/۷۹ c
	۶۰	۰/۱۳ b	۰/۱۷ bc	۰/۲۰ c	۰/۲۹ c	۰/۳۶ c	۰/۴۲ d	۰/۴۶ d	۰/۴۹ d	۰/۵۳ e	۰/۵۴ d
		بابل									
۰	۴۰	۰/۳۱ c	۰/۳۳۰ d	۰/۳۴ c	۰/۳۵ d	۰/۳۵ d	۰/۳۶ d	۰/۳۷ de	۰/۳۸ de	۰/۳۹ e	۰/۴۰ e
	۶۰	۰/۱۲ e	۰/۱۷ e	۰/۲۰c	۰/۲۲ d	۰/۲۴ d	۰/۲۶ d	۰/۲۸ e	۰/۲۹ e	۰/۳۱ e	۰/۳۱ e
۵۰۰	۴۰	۰/۳۷ c	۰/۴۳ c	۰/۴۹ b	۰/۵۷ c	۰/۶۷ d	۰/۷۴ c	۰/۸۱ c	۰/۹۴ c	۱/۰۲ c	۱/۰۶ c
	۶۰	۰/۱۶ de	۰/۲۰ e	۰/۲۳ c	۰/۲۸ d	۰/۲۵ c	۰/۳۹ d	۰/۳۸ de	۰/۴۲ de	۰/۵۰ de	۰/۵۳ de
۱۰۰۰	۴۰	۰/۴۵ b	۰/۵۱ b	۰/۶۱ b	۰/۶۷ c	۰/۷۵ d	۰/۸۱ c	۰/۸۸ c	۱/۰۳ c	۱/۱۹ c	۱/۲۷ c
	۶۰	۰/۲۲ d	۰/۲۴ e	۰/۲۷ c	۰/۳۳ d	۰/۳۸ bc	۰/۴۴ d	۰/۵۰ d	۰/۵۷ d	۰/۶۴ d	۰/۷۲ d
		قزلر									
۰	۴۰	۰/۲۴c	۰/۲۵ cd	۰/۲۶ bc	۰/۳۱ cd	۰/۳۴ de	۰/۳۶ e	۰/۴۲ de	۰/۴۶ e	۰/۴۹ e	۰/۵۲ f
	۶۰	۰/۱۳ d	۰/۱۵ e	۰/۱۷ c	۰/۲۱ d	۰/۲۲ e	۰/۳۲ e	۰/۳۴ e	۰/۳۹ e	۰/۴۲ e	۰/۴۶ f
۵۰۰	۴۰	۰/۲۸ b	۰/۳۳ bc	۰/۳۵ b	۰/۴۲ bc	۰/۵۱ cd	۰/۷۲ bc	۰/۹۶ bc	۱/۰۵ bc	۱/۱۰ cd	۱/۱۹ d
	۶۰	۰/۲۰ c	۰/۲۰ de	۰/۲۷ bc	۰/۲۸ cd	۰/۳۶ de	۰/۴۶ de	۰/۵۶ d	۰/۶۵ d	۰/۷۱ de	۰/۷۸ e
۱۰۰۰	۴۰	۰/۲۸ b	۰/۳۸ b	۰/۴۰ b	۰/۵۱ b	۰/۷۱ b	۰/۹۰ b	۱/۱ b	۱/۲۱ b	۱/۳۷ bc	۱/۴۳ c
	۶۰	۰/۲۴ c	۰/۲۹ c	۰/۳۳ b	۰/۳۰ cd	۰/۵۸ bc	۰/۶۴ cd	۰/۸۳ c	۰/۸۹ c	۰/۹۸ cd	۱/۰۵ d
		فلارد									
۰	۴۰	۰/۲۱ ef	۰/۲۵ de	۰/۲۶ de	۰/۲۹ e	۰/۳۰ d	۰/۳۲ e	۰/۳۳ef	۰/۳۵ f	۰/۳۵ f	۰/۳۶ f
	۶۰	۰/۱۲ g	۰/۱۶ f	۰/۲۱ e	۰/۲۴ e	۰/۲۶ d	۰/۲۷ e	۰/۲۸ f	۰/۳۰ f	۰/۳۱ f	۰/۳۳ f
۵۰۰	۴۰	۰/۲۷ cd	۰/۳۰ cd	۰/۳۲ cd	۰/۳۸cd	۰/۳۹ cd	۰/۴۸ d	۰/۵۵ d	۰/۵۹ d	۰/۶۲ d	۰/۶۵ d
	۶۰	۰/۱۵ fg	۰/۱۷ ef	۰/۲۳ e	۰/۲۸ e	۰/۳۲ d	۰/۳۵ e	۰/۴۱ e	۰/۴۴ e	۰/۴۶ e	۰/۴۸ e
۱۰۰۰	۴۰	۰/۳۰ c	۰/۳۷ c	۰/۴۰ c	۰/۴۳ c	۰/۵۷ c	۰/۷۱ c	۰/۸۲ c	۰/۹۱ c	۰/۹۴ c	۰/۹۷ c
	۶۰	۰/۲۲ de	۰/۲۶ d	۰/۲۵ de	۰/۳۲de	۰/۳۸ cd	۰/۴۸ d	۰/۵۶ d	۰/۶۲ d	۰/۶۵ d	۰/۶۹ d
		شریف آباد									
۰	۴۰	۰/۲۳ cd	۰/۲۳ de	۰/۲۵def	۰/۲۹ ef	۰/۳۲ de	۰/۳۵b	۰/۳۸۰ e	۰/۴۱ e	۰/۴۳ e	۰/۴۵ e
	۶۰	۰/۱۹ d	۰/۱۹ e	۰/۲۰ f	۰/۲۳ f	۰/۲۷ e	۰/۲۹b	۰/۳۱ e	۰/۳۳۰e	۰/۳۵ e	۰/۳۶ e
۵۰۰	۴۰	۰/۲۸ bc	۰/۲۹ cd	۰/۳۰ cd	۰/۳۶ d	۰/۴۷ cd	۰/۵۲b	۰/۶۳ d	۰/۶۸ d	۰/۷۱ d	۰/۷۳ d
	۶۰	۰/۲۱ d	۰/۲۲ e	۰/۲۳ ef	۰/۲۵ f	۰/۳۱ de	۰/۳۵b	۰/۳۹ e	۰/۴۳ e	۰/۴۶ e	۰/۴۸ e
۱۰۰۰	۴۰	۰/۳۰ b	۰/۳۲ c	۰/۳۴ c	۰/۴۱ c	۰/۵۴ c	۰/۸۳b	۱/۱۵ c	۱/۲۳ c	۱/۲۸ c	۱/۳۲ c
	۶۰	۰/۲۳ cd	۰/۲۴ de	۰/۲۸ de	۰/۳۳ de	۰/۴۲cde	۰/۵۴b	۰/۶۵ d	۰/۷۶ d	۰/۷۹ d	۰/۸۱ d

* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

زمان انکوباسیون در ۶۰ درصد رطوبت اشباع (معادل ۱/۲ برابر رطوبت ظرفیت زراعی)، گویای تأیید آن است. بیشترین کاهش pH این خاک‌ها از روز ۴۰ تا ۳۶۰ بسته به ظرفیت بافری خاک (مواد آلی، آهک و رس) متفاوت بود. در روز ۳۶۰، تمام خاک‌ها غیر از خاک غیر آهکی بالستان، pH شروع به افزایش کرد، که نشان‌دهنده اثر موقتی گوگرد است. کاهش pH و افزایش اسید تولید شده در خاک‌های غیر آهکی و آهکی در اثر اکسایش گوگرد می‌باشد به‌عبارت دیگر در حضور باکتری‌های تیوباسیلوس، گوگرد در خاک اکسید شده و با تولید اسید سولفوریک باعث کاهش pH خاک می‌شود (رابطه ۳). نتایج این تحقیق مبنی بر کاهش محدودتر pH (در اثر کاهش نرخ اکسایش گوگرد) در رطوبت‌های زیاد (۶۰ درصد) نسبت به رطوبت‌های کمتر (۴۰ درصد)، با یافته‌های مطالعات پیشین همچون Tisdale and Nelson (1958)، Kalbasi et al. (1988)، Kaplan and Orman (1998)، Kaplan and Orman (2009)، Orman and Hüseyin (2012)، Hashemimajd et al. (2012) و قادری و همکاران (۱۳۹۶) همسو است. مکانیسم این پدیده بدین صورت است که افزایش رطوبت به بیش از نقطه بهینه (حدود ۴۰ درصد رطوبت اشباع، که تقریباً معادل ظرفیت مزرعه است)، منجر به محدودیت تهویه و کاهش شدید

انتشار اکسیژن در خاک می‌شود. از آنجایی که باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (مانند تیوباسیلوس) هوازی هستند، این کاهش در دسترس بودن اکسیژن، فعالیت متابولیک و رشد آن‌ها را به طور قابل‌توجهی مهار می‌کند. در نتیجه، نرخ اکسایش گوگرد و تولید اسید سولفوریک کاهش یافته و بنابراین، میزان کاهش pH نیز کمتر خواهد بود. به نظر می‌رسد در خاک‌های با ظرفیت بافری بیشتر، گوگرد می‌تواند برای اصلاح pH مفید باشد، اما ممکن است نیاز به مقادیر بیشتر از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار باشد. بنابراین کاهش pH در خاک‌های با محتوای بالای کربنات کلسیم گذرا بوده، در حالی که در خاک‌های کم‌آهک پایدارتر است. این موضوع نشان‌دهنده لزوم مصرف پیوسته و مدیریت شده گوگرد برای پایداری اثر اصلاحی در خاک‌های آهکی است.

تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC)

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، EC خاک در هر دو سطح رطوبتی افزایش یافت (جدول ۶). با این حال، شدت افزایش EC در رطوبت ۴۰ درصد به‌طور قابل توجهی بیشتر از رطوبت ۶۰ درصد بود. بیشترین مقدار EC در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد مشاهده شد که به غلظت بالاتر یون‌های محلول (ناشی از رطوبت کمتر و کاهش رقت) و پایین‌تر بودن pH در این شرایط مرتبط است. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار افزایش EC (۱/۱۵ dS/m) در خاک قزلر نسبت به خاک‌های دیگر بیش‌تر بود که این ناشی از مقدار اکسایش بیش‌تر گوگرد، تولید اسید سولفوریک، کاهش بیش‌تر pH خاک (۰/۷۸ واحد کاهش) و در نتیجه حل‌شدن ترکیبات محلول در خاک می‌باشد. برخی محققان بیشترین میزان افزایش EC در خاک را به تجمع نمک‌های حاصل از اکسایش گوگرد نسبت دادند (Slaton, 1998 ; قادری و همکاران، ۱۳۹۶). بدین صورت که در اثر اکسایش گوگرد در خاک، اسید سولفوریک تولید شده که با کربنات‌های کلسیم و منیزیم واکنش داده و موجب انحلال آن‌ها می‌شوند (روابط ۳ تا ۵). اسید سولفوریک حاصل از اکسایش گوگرد با کربنات کلسیم واکنش داده و سولفات کلسیم (گچ) تولید می‌کند که باعث کاهش pH موضعی می‌شود (رابطه ۴). از طرف دیگر، در نتیجه تشکیل املاح محلول و تشکیل سولفات‌های کلسیم (گچ) و منیزیم در خاک، EC خاک افزایش می‌یابد (سلتون، ۱۹۹۸). افزایش معنی‌دار EC خاک در پاسخ به کاربرد گوگرد، به‌طور مستقیم به‌واسطه اسیدی‌شدن ناشی از اکسایش گوگرد است. این اسید ضمن کاهش pH، باعث انحلال ترکیبات معدنی خاک (از جمله کربنات‌ها، فسفات‌ها و اکسیدهای فلزی) شده و مقادیر قابل‌توجهی از یون‌های محلول را در محلول خاک آزاد می‌کند (Abdel-Fattah et al., 2005; Safaa et al., 2013). روند افزایشی EC در طول زمان انکوباسیون نشان‌دهنده تداوم فعالیت میکروبی و پیشرفت تدریجی فرایند اکسایش و انحلال است، به‌طوری که حداکثر تجمع یون‌های محلول و در نتیجه بیشینه مقدار EC در پایان دوره آزمایش (۳۶۰ روز) ثبت شد. این الگو کاملاً منطبق بر یافته‌های Hashemimajd et al. (2012) و قادری و همکاران (۱۳۹۶) است که آن را به تدریجی بودن واکنش‌های اکسایش و نیاز به زمان کافی برای تکمیل فرایندهای شیمیایی و میکروبی نسبت داده‌اند. در خاک‌های آهکی، واکنش اسید سولفوریک با کربنات کلسیم و تولید گچ که حلالیت نسبتاً زیادی دارد، سهم عمده‌ای در افزایش شوری دارد (Orman & Hüseyin, 2012; El-Kholy et al., 2013).

تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر فسفر و سولفات محلول خاک

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در هر دو محتوای رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، غلظت فسفر قابل استفاده خاک افزایش یافت ($p < 0.05$) (جدول ۷). افزایش گوگرد معمولاً باعث افزایش فسفر محلول می‌شود، زیرا اکسایش گوگرد اسیدیته خاک را افزایش داده و حلالیت فسفر را بهبود می‌بخشد. بیشترین مقدار فسفر در ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰٪ در خاک‌های رسی بابل (۴۱/۱ میلیگرم فسفر برکیلوگرم خاک) مشاهده شد (جدول ۷). خاک بابل به دلیل ترکیب بافت رسی، محتوای آهک پایین، ماده آلی نسبتاً بالا، و شرایط بهینه رطوبتی و گوگردی، بیشترین پاسخ را در افزایش فسفر قابل‌جذب نشان داده است. این عوامل باعث شدند که اکسایش گوگرد به طور مؤثری pH را کاهش داده و فسفر خاک را آزاد کند. مطابق با نتایج این تحقیق، قادری و همکاران (۱۳۹۶) و Kaplan and Orman (1998) گزارش کردند که افزایش مقدار فسفر قابل‌جذب با کاربرد گوگرد به کاهش pH خاک و آزادسازی فسفر از ترکیبات نامحلول نسبت داده می‌شود. غلظت فسفر قابل‌جذب در خاک‌های با درصد آهک زیاد (فلارد و شریف آباد) درطول انکوباسیون تا روز ۲۷۰ افزایش و سپس شروع به کاهش می‌کند که احتمالاً به افزایش pH در روزهای پایانی به دلیل خاصیت بافری خاک بر می‌گردد. بابایی و همکاران (۱۳۹۱) گزارش کردند که در خاک‌های آهکی، غلظت زیاد یون کلسیم در محلول خاک با تبدیل یون‌های فسفات به‌صورت فسفات‌های مختلف کلسیم منجر به کاهش غلظت فسفات قابل جذب خاک می‌گردد.

همانند نتایج فسفر قابل‌جذب، مقدار سولفات محلول خاک با کاربرد گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی نیز به طور معنی‌دار افزایش

یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر آن، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد وجود داشت (جدول ۷). روند افزایش غلظت سولفات محلول در مقادیر زیاد گوگرد مصرفی از شدت بیش‌تری برخوردار بود ($p < 0.05$). در این فرایند، باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (تیوباسیلوس) با استفاده از گوگرد به عنوان منبع انرژی، آن را طی یک سری واکنش‌های آنزیمی به سولفات تبدیل می‌کنند (Chaudhary et al., 2023). بیش‌ترین مقدار افزایش غلظت سولفات محلول با تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در شرایط ۴۰ درصد رطوبت اشباع بود و در خاک بابل (۲۶۹۰ میلیگرم سولفات برکیلوگرم خاک) مشاهده شد. به نظر می‌رسد این شرایط رطوبتی (۴۰٪) نقطه بهینه‌ای را فراهم می‌کند که در آن تبادل گازی (تهویه) و در نتیجه دسترسی به اکسیژن (که برای متابولیسم باکتری‌های هوازی اکسیدکننده گوگرد ضروری است) در حداکثر خود قرار دارد. از سوی دیگر، افزایش رطوبت به ۶۰٪ اشباع، با کاهش نفوذپذیری اکسیژن در محیط خاک، منجر به محدودیت تهویه و در نتیجه مهار فعالیت این جامعه میکروبی و نرخ اکسایش می‌شود (Germida & Janzen, 1993). این الگو که در مطالعاتی با شرایط مشابه نیز گزارش شده است (قادری و همکاران ۱۳۹۶؛Orman & Kaplan, 2009). علاوه بر این، اسید سولفوریک تولید شده از اکسایش گوگرد، با انحلال ترکیبات معدنی حاوی سولفات در خاک، به افزایش بیشتر غلظت این آنیون در محلول خاک کمک می‌کند (El-Kholy et al., 2013).

جدول ۷. مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر فسفر و سولفات محلول خاک‌های مورد آزمایش

	گوگرد	رطوبت اشباع	فسفر (mg/kg)				سولفات محلول (mg/kg)			
	(kg/ha)	(٪)	۴۰ روز	۸۰ روز	۱۲۰ روز	۳۶۰ روز	۲۵	۶۰	۳۶۰
بالستان	۰	۴۰	۷/۳ e	۷/۴ ef	۷/۶ e	۷/۷ f	۸۶ f	۱۱۳ f	۱۳۱ ef
		۶۰	۷/۲ f	۷/۲ f	۷/۳ f	۷/۳g	۶۵ f	۸۵ f	۱۰۲ f
	۵۰۰	۴۰	۷/۶ c	۷/۸ cd	۸/۱ d	۸/۳ d	۱۲۷de	۵۲۶ de	۶۱۹ cd
		۶۰	۷/۳ e	۷/۴ ef	۷/۷e	۷/۹ ef	۳۴۳ e	۳۹۰ e	۴۷۹ de
	۱۰۰۰	۴۰	۸/۴ a	۹/۱a	۹/۸ a	۱۰/۴ a	۶۴۱ c	۷۲۹ c	۸۹۷ c
		۶۰	۷/۸ b	۸/۴ b	۸/۸ b	۹/۰۳ b	۵۲۹ cd	۵۵۱d	۷۷۷ cd
بابل	۰	۴۰	۳۶/۸ c	۳۷/۳ f	۳۷/۳ f	۳۷/۶ fg	۲۳۰ g	۳۵۷ g	۵۱۱ g
		۶۰	۳۶/۵۰ h	۳۷ g	۳۷/۲۰ f	۳۷/۳ g	۱۷۷ g	۲۴۰ h	۴۲۰ g
	۵۰۰	۴۰	۳۷/۵ e	۳۸/۲ d	۳۸/۴ e	۳۸/۹ e	۱۰۹۹ d	۱۲۵۵ d	۱۴۷۹ d
		۶۰	۳۷/۱ f	۳۷/۶ e	۳۷/۴ f	۳۸ f	۴۶۱ f	۵۹۳ f	۷۷۰ f
	۱۰۰۰	۴۰	۳۸/۳ c	۳۹/۳ c	۴۰/۵ c	۴۱/۱ c	۲۰۵۸ c	۲۳۶۷ c	۲۶۹۰ c
		۶۰	۳۷/۷ d	۳۸/۳ d	۳۹/۲ d	۴۰ d	۸۷۴ e	۹۸۸ e	۱۲۰۰ e
قزلر	۰	۴۰	۷/۱ d	۷/۴ d	۷/۵ d	۷/۵ d	۲۲۸ g	۲۳۰ g	۲۶۲ g
		۶۰	۶/۴e	۶/۷ f	۶/۶ f	۷/۷ e	۱۵۹ g	۱۶۸ g	۲۳۵ g
	۵۰۰	۴۰	۷/۴ c	۷/۷ c	۷/۹ c	۸/۲ c	۱۳۳۰ e	۱۴۷۹ e	۱۵۷۷ e
		۶۰	۶/۵ e	۶/۹ e	۷ e	۷/۴ d	۱۲۰۱ f	۱۲۷۷ f	۱۳۹۲ f
	۱۰۰۰	۴۰	۸/۱a	۸/۷ a	۹/۲ a	۱۰ a	۲۰۰۹ c	۲۲۵۱ c	۲۴۷۰ c
		۶۰	۷/۴c	۸/۱ b	۸/۵ b	۹/۲ b	۱۵۶۵ d	۱۶۸۴ d	۱۸۵۴ d
فلارد	۰	۴۰	۵/۶۵ d	۵/۸ de	۵/۹۲ cd	۵/۹ e	۱۹۳ g	۲۴۱ f	۲۰۱ f
		۶۰	۵/۳۹ e	۵/۵ f	۵/۶ d	۵/۶ f	۱۵۴ h	۲۰۲ g	۱۶۵ f
	۵۰۰	۴۰	۵/۸۱ cd	۵/۹ cd	۵/۸ d	۶ de	۵۹۰ e	۸۹۰ d	۶۴۰ d
		۶۰	۵/۵ e	۵/۶ ef	۵/۸ d	۵/۷ ef	۵۴۰ f	۶۸۰ e	۴۹۲ e
	۱۰۰۰	۴۰	۶/۵ a	۷/۱ a	۷/۶ a	۷/۴ a	۹۷۴ c	۱۲۸۰ c	۸۴۰ c
		۶۰	۵/۹ c	۶/۳ b	۶/۷ b	۶/۵ b	۷۷۲ d	۸۹۰ d	۷۳۲ d
شریف آباد	۰	۴۰	۱۵/۶ d	۱۵/۷ ef	۱۵/۹ e	۱۵/۸ e	۴۷ g	۶۰ g	۵۱ f
		۶۰	۱۵/۴ f	۱۵/۵ g	۱۵/۷ f	۱۵/۶ f	۳۱ h	۴۶ g	۴۱ f
	۵۰۰	۴۰	۱۵/۸ c	۱۶/۱ cd	۱۶/۴ d	۱۶/۲ cd	۳۴۳ e	۴۹۰ e	۳۸۹ e
		۶۰	۱۵/۵ e	۱۵/۷ f	۱۶ e	۱۵/۸ e	۲۹۲ f	۴۰۱ f	۳۲۵ e
	۱۰۰۰	۴۰	۱۶/۳ a	۱۶/۸ a	۱۷/۲ a	۱۷ a	۶۴۲ c	۸۷۸ c	۷۵۵ c
		۶۰	۱۵/۸ c	۱۶/۲ c	۱۶/۶ c	۱۶/۳ c	۴۸۷ d	۷۶۷ d	۵۸۳ d

* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر غلظت آهن و روی قابل‌جذب خاک

نتایج نشان داد با افزایش سطح مصرف گوگرد در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع و با افزایش مدت زمان انکوباسیون نسبت به تیمار شاهد، غلظت آهن و روی قابل‌استفاده خاک افزایش یافت ($p < 0.05$؛ جدول ۸). این افزایش نه‌تنها ناشی از کاهش pH خاک در اثر اکسایش گوگرد و بهبود حلالیت این عناصر است، بلکه می‌تواند به دلیل کلات‌سازی زیستی توسط باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد

(مانند Thiobacillus) نیز باشد. این میکروارگانیسم‌ها با ترشح ترکیبات آلی (مانند اسیدهای آلی و سیدروفورها) قادر به تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی بوده و به رهاسازی آهن و روی از فازهای معدنی خاک کمک می‌کنند. همچنین، افزایش کلی فعالیت میکروبی در حضور گوگرد و مواد آلی می‌تواند با تسریع چرخه عناصر و آزادسازی آن‌ها از کانی‌های اولیه و ثانویه، در افزایش تحرک و قابلیت جذب آهن و روی نقش داشته باشد. بیشترین تأثیر در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد و کمترین تأثیر در تیمار شاهد (بدون گوگرد) و رطوبت ۶۰ درصد مشاهده شد. Kalbasi et al. (1988) و Safaa et al. (2013) گزارش کردند که اکسایش گوگرد در اثر کاربرد آن در خاک با تولید اسید سولفوریک، pH و غلظت بی‌کربنات را کاهش و مقدار آهن و روی قابل‌جذب را افزایش می‌دهد. بیشترین غلظت آهن و روی به ترتیب در خاک بابل مشاهده شد که یکی از دلایل آن اکسایش بیشتر گوگرد در این خاک (جدول ۴) و دلیل دیگر زیاد بودن مقادیر اولیه آهن و روی در این خاک است (جدول ۳). بیشترین غلظت آهن و روی به ترتیب در خاک بابل مشاهده شد که علاوه بر اکسایش بیشتر گوگرد (جدول ۴) و مقادیر اولیه بالاتر این عناصر (جدول ۳)، می‌توان به نقش بافت رسی و محتوی ماده آلی نسبتاً بالای این خاک نیز اشاره کرد. بافت رسی با دارا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بالا و سطح ویژه زیاد، توانایی بهتری در نگهداری و تبادل کاتیون‌های فلزی از جمله آهن و روی دارد. همچنین، ماده آلی با تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی پایدار و جلوگیری از بازتثبیت این عناصر، قابلیت دسترسی آن‌ها را در خاک افزایش می‌دهد. بنابراین نقش گوگرد در افزایش در دسترس بودن ریزمغذی‌ها، علاوه بر اثر شیمیایی اسیدیته، از طریق تغییر در پویایی میکروبی و ساختار شیمیایی محلول خاک نیز تقویت می‌شود.

جدول ۸. مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر آهن و روی قابل‌جذب خاک‌های مورد آزمایش

	گوگرد (kg/ha)	رطوبت اشباع (٪)	آهن (mg/kg)				روی (mg/kg)			
			۴۰ روز	۸۰ روز	۱۲۰ روز	۳۶۰ روز	۴۰ روز	۸۰ روز	۱۲۰ روز	۳۶۰ روز
بالستان	۰	۴۰	۴/۶۷ c	۴/۷۲ c	۴/۷۵ c	۴/۷۳ g	۰/۴۱ b	۰/۴۲ c	۰/۴۴ de	۰/۴۴ e
		۶۰	۴/۶۲ c	۴/۶۵ c	۴/۶۷ h	۴/۶۶ g	۰/۴۰ b	۰/۴۱ c	۰/۴۳ e	۰/۴۳ e
	۵۰۰	۴۰	۴/۹۰ bc	۵/۲۴ d	۵/۴۲ d	۵/۵۱ d	۰/۴۴ b	۰/۴۷ bc	۰/۵۲ cd	۰/۵۴ cd
		۶۰	۴/۶۹ c	۴/۸۷ f	۵/۰۸ f	۵/۰۷ f	۰/۴۲ b	۰/۴۴ c	۰/۴۷ cde	۰/۴۹ de
	۱۰۰۰	۴۰	۵/۱۰ b	۵/۴۴ c	۵/۷۰ c	۵/۷۵ c	۰/۴۸ ab	۰/۵۵ b	۰/۶۲ b	۰/۶۴ b
		۶۰	۵/۱۷ b	۵/۱۰ e	۵/۲۲ e	۵/۳۰ e	۰/۴۴ b	۰/۴۷ bc	۰/۵۳ c	۰/۵۶ cd
بابل	۰	۴۰	۶۰/۸۲ a	۶۱ ab	۶۱/۱۰ a	۶۱/۳۰ d	۰/۹۷ e	۰/۹۹ e	۱/۰۱ cd	۱/۰۲ e
		۶۰	۴۸/۶۴ c	۵۰/۱ c	۵۰/۲۰ c	۵۰/۳۰ h	۰/۸۳ f	۰/۸۵ f	۰/۸۹ e	۰/۸۹ f
	۵۰۰	۴۰	۶۱/۳۰۸ a	۵۸/۳۰ b	۶۱/۹۰ a	۶۲/۴۰ c	۱/۰۳ cd	۱/۰۷ cd	۱/۰۹ c	۱/۱۴ d
		۶۰	۵۰/۲ b	۵۰/۴۰ c	۵۰/۷۰ c	۵۱ g	۰/۹۵ e	۰/۹۹ de	۱ d	۱/۰۵ e
	۱۰۰۰	۴۰	۶۱/۶۰ a	۶۱/۹ ab	۵۸/۹۳ ab	۶۲/۹۰ b	۱/۰۹ b	۱/۱۲ bc	۱/۱۹ b	۱/۲۵ c
		۶۰	۵۰/۷ b	۵۰/۸۳ c	۵۱ c	۵۱/۲۳ f	۰/۹۹ de	۱/۰۴ de	۱/۰۶ cd	۱/۰۹ a
قزلر	۰	۴۰	۷/۱۵ c	۷/۲۹ de	۷/۳۲ e	۷/۴۲ d	۰/۷۱ bc	۰/۷۷ bc	۰/۷۹ b	۰/۸ bc
		۶۰	۶/۴۱ f	۶/۴۹ g	۶/۴۷ g	۶/۶۳ f	۰/۶۳ c	۰/۶۶ c	۰/۶۹ b	۰/۷ c
	۵۰۰	۴۰	۷/۲۵ c	۷/۴۲d	۷/۵۷ d	۷/۷۷ c	۰/۷۷ bc	۰/۸۳ bc	۰/۸۱ b	۰/۹۱ bc
		۶۰	۶/۶۶ e	۶/۷۹ f	۶/۸۱ f	۶/۹۷ e	۰/۷۲ bc	۰/۷۷ bc	۰/۷۷ b	۰/۸۳ bc
	۱۰۰۰	۴۰	۷/۴۹ b	۷/۸۷ b	۸/۲۳ b	۸/۵۷ b	۰/۸۳ ab	۰/۸۹ b	۰/۸۶ b	۱ b
		۶۰	۷/۹۴ d	۷/۲۰ e	۷/۵۹ d	۷/۷۳ c	۰/۷۷ bc	۰/۷۹ bc	۰/۸۲ b	۰/۸۸ bc
فلارد	۰	۴۰	۴/۵۳ de	۴/۶۰ b	۴/۶۴ fg	۴/۶۲ fg	۰/۳۲cde	۰/۳۴ de	۰/۳۷ ef	۰/۳۶ ef
		۶۰	۴/۴۸ e	۴/۸۶ b	۴/۵۷ g	۴/۵۵ g	۰/۲۶ e	۰/۳۱ e	۰/۳۴ f	۰/۳۲ f
	۵۰۰	۴۰	۴/۵۹ d	۴/۶۹ b	۴/۸۴ d	۴/۸۳ d	۰/۳۵ cd	۰/۴۱ cd	۰/۴۸ d	۰/۴۵ d
		۶۰	۴/۵۴ de	۴/۶۱ b	۴/۷۱ ef	۴/۶۴ ef	۰/۳۱ de	۰/۳۶ de	۰/۴۴ ef	۰/۴۲ de
	۱۰۰۰	۴۰	۴/۶۷ c	۴/۸۳ b	۵ c	۴/۹۱ c	۰/۴۰ c	۰/۴۸ bc	۰/۵۶ c	۰/۵۴ c
		۶۰	۴/۵۹ d	۴/۶۸ b	۴/۷۵e	۴/۷۱ e	۰/۳۵ cd	۰/۴۰ cd	۰/۴۶ de	۰/۴۳ de
شریف آباد	۰	۴۰	۶/۱۲ ef	۶/۱۵ f	۶/۲۰ e	۶/۱۷ e	۰/۴۱ cd	۰/۴۲ ef	۰/۴۴ fg	۰/۴۳ f
		۶۰	۶/۰۱ g	۶/۰۵ g	۶/۱ f	۶/۰۷ f	۰/۳۹ d	۰/۴۰ f	۰/۴۲ g	۰/۴۲ e
	۵۰۰	۴۰	۶/۲۰ d	۶/۳۷ d	۶/۵۳ c	۶/۴۶ c	۰/۴۴ cd	۰/۵۰ de	۰/۵۹ de	۰/۵۷ de
		۶۰	۶/۰۹ f	۶/۲۰ f	۶/۳۵ d	۶/۲۹ d	۰/۴۲ cd	۰/۴۵ def	۰/۵۱ ef	۰/۵۰ ef
	۱۰۰۰	۴۰	۶/۳۰ c	۶/۵۲ c	۶/۸۴ b	۶/۷۸ b	۰/۵۰ c	۰/۶۳ c	۰/۷۲ c	۰/۶۹ c
		۶۰	۶/۱۶ de	۶/۲۸ e	۶/۵۷ c	۶/۷۶ c	۰/۴۶ cd	۰/۵۱ d	۰/۶۳ d	۰/۶۲ cd

* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که شرایط رطوبتی ۴۰ درصد (بهینه) و کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، بیشترین نرخ اکسایش گوگرد را به‌دنبال دارد. این افزایش قابل توجه در نرخ اکسایش، عمدتاً ناشی از فعالیت باکتری تیوباسیلوس به‌عنوان کاتالیزور زیستی فرایند اکسایش بود که در شرایط رطوبتی بهینه و همراه با گوگرد، تولید اسید سولفوریک را تسریع کرد. افزایش رطوبت به ۶۰ درصد، با محدود کردن اکسیژن‌رسانی و کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده، منجر به کاهش نرخ اکسایش شد. از دیدگاه اصلاح خاک، کاربرد گوگرد به‌ویژه در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و در شرایط رطوبتی ۴۰ درصد، بیشترین تأثیر را در کاهش pH، EC، و افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی مانند فسفر، سولفات، آهن و روی داشت. این تغییرات در خاک‌های با درصد آهک کم بارزتر بود، در حالی که در خاک‌های با آهک زیاد (مانند شریف‌آباد با ۴۴ درصد آهک)، به دلیل ظرفیت بافری زیاد، کاهش pH و افزایش عناصر قابل‌جذب محدودتر بود. این مطالعه نشان داد که کاربرد گوگرد پاستیل تولیدی پژوهشگاه صنعت نفت همراه با باکتری تیوباسیلوس، در شرایط رطوبتی بهینه (۴۰ درصد رطوبت اشباع) می‌تواند به‌عنوان یک راهکار عملی و مؤثر برای اصلاح خاک‌های آهکی با محتوای کربنات کلسیم کمتر از ۵۰ درصد مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، گوگرد تولید داخلی با کیفیت مطلوب می‌تواند در برنامه‌های مدیریت تغذیه و اصلاح خاک‌های قلیایی ایران به‌کار گرفته شود. به‌منظور انتقال نتایج به شرایط مزرعه‌ای، پیشنهاد می‌شود آزمایش‌های میدانی در خاک‌های با با درصد کربنات کلسیم بیشتر از ۵۰ درصد انجام شود تا دوز بحرانی گوگرد و رطوبت بهینه برای هر بافت خاک تعیین گردد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی خاصی از نهادهای تأمین‌کننده اعتبار در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: جلال قادری، ندا محمدی ؛ تهیه گزارش پژوهش: جلال قادری، کمال خلخال، کریم شهبازی، محمد حسین داوودی.؛ تحلیل داده‌ها جلال قادری، محمد حسین داوودی، کریم شهبازی، کمال خلخال.

نویسندگان به طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان اعلام می‌دارند که در فرآیند آماده‌سازی این مقاله، از هیچ‌گونه فناوری هوش مصنوعی مولد یا ابزارهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند. نویسندگان مسئولیت کامل اصالت و محتوای این انتشار را بر عهده دارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از متخصصان آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب و همچنین از تیم فنی پژوهشگاه صنعت نفت برای تهیه گوگرد گرانوله مورد استفاده در پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

بشارتی، حسین؛ خسروی، هوشنگ؛ مستشاری، مهرزاد؛ میرزاشاهی، کامران؛ قادری، جلال و ذبیحی، حمیدرضا. (۱۳۹۵). بررسی اثر تیوباسیلوس، گوگرد و فسفات بر شاخص‌های رشد ذرت در برخی از مناطق ایران. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۴(۱)، ۱۰۳-۱۱۳.

شهبازی، کریم و بشارتی کلایه، حسین. (۱۳۹۲). بررسی اجمالی وضعیت حاصلخیزی خاکهای کشاورزی ایران. *مدیریت اراضی*، ۱(۱)، ۱-۱۵. https://doi.org/10.22092/lmj.2013.100072

شهبازی، کریم؛ مارزی، مصطفی؛ محمدی، محمد حسین؛ اسدی، حسین؛ فتحی گردلیدانی، ارژنگ؛ سادات هاشمی نسب زواره، کبرا؛ طلوعی، رویا؛ بهشتی، مهدی؛ آویژگان، ایوب و چراغی، میثم. (۱۴۰۳). *روش‌های تجزیه خاک نمونه برداری، روش‌های شیمیایی و فیزیکی*. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور. تهران. ایران.

قادری، جلال؛ ملکوتی، محمدجعفر؛ خاوازی، کاظم و داوودی، محمدحسین. (۱۳۹۷). تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسایش گوگرد و برخی از خصوصیات شیمیایی خاک. *زیست شناسی خاک*، ۶(۲)، ۱۲۵-۱۳۶.

REFERENCES

Abdel-Fattah, A., Rasheed, M. A., & Shafei, A. M. (2005). Phosphorus availability as influenced by different application rates of elemental sulfur to soils. *Egyptian Journal of Soil Science*, 45(2), 199–208. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20073105198

Abdou, A., Soaud, A. A., Al Darwish, F. H., Saleh, M. E., El-Tarabily, K. A., Sofian-Azirun, M., & Motior, R. M. (2011). Effects of elemental sulfur, phosphorus, micronutrients and Paracoccus versutus on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5(5), 554–561. https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.280328348003505

Allison, L. E., & Moodie, C. D. (1965). Carbonates. In C. A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis.* Part 2. Chemical and Microbiological Properties (pp. 1379–1398). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

Bower, C. A., Reitemeier, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soil. *Soil Science*, 73(4), 251–261. https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00004

Besharati, H., Khosravi, H., Mostashari, M., Mirzashahi, K., Ghaderi, J., & Zabihi, H. (2016). Effect of Thiobacillus, sulfur and phosphate on growth indices of maize in some regions of Iran. *Scientific and Research Journal of Applied Soil Research*, 4(1), 103–113. https://doi.org/10.29252/asr.4.1.1033. (In Persian).

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen—Total. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis.* Part 3—Chemical Methods (pp. 1085–1121). Soil Science Society of America. Madison, WI. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37

Chaudhary, S. (2018). *Characterization of sulphur oxidizing bacteria and their effect on growth of mustard (Brassica juncea L.)* (Doctoral dissertation, CCS Haryana Agricultural University, Hisar, Haryana, India). Retrieved from Shodhganga.

Chaudhary, S., Sindhu, S. S., Dhanker, R., & Kumari, A. (2023). Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, 271, 127340. https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340

Chesnin, L., & Yien, C. H. (1951). Turbidimetric determination of available sulfates. *Proceedings. Soil Science Society of America*, 15, 149–151.

El-Kholy, A. M., Ali, O. M., El-Sikhry, E. M., & Mohamed, A. I. (2013). Effect of sulfur application on the availability of some nutrients in Egyptian soils. *Egyptian Journal of Soil Science*, 53(3), 361–377. https://doi.org/10.21608/ejss.2013.173

Ghaderi, J., Malakouti, M. J., Khavazi, K., & Davoodi, M. H. (2019). Sulfur oxidation under different moisture conditions and its effect on some chemical soil characteristics. *Journal of Soil Biology*, 6(2), 125–136. https://doi.org/10.22092/sbj.2019.118567. (In Persian).

Hashemimajd, K., Mohamadi Farani, T., & Jamaati, S. (2012). Effect of elemental sulfur and compost on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. *African Journal of Biotechnology*, 11(6), 1425–1432. https://doi.org/10.5897/AJB11.2800

Jaggi, R. C., Aulakh, M. S., & Sharma, R. (2005). Impacts of elemental sulfur applied under various temperature and moisture regimes on pH and available phosphorus in acidic, neutral and alkaline soils. *Biology and Fertility of Soils*, 41(1), 52–58. https://doi.org/10.1007/s00374-004-0811-0

Janzen, H. H., & Bettany, J. R. (1987). Oxidation of elemental sulfur under field conditions in central Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 67(3), 609–618. https://doi.org/10.4141/cjss87-058

Kalbasi, M., Filsoof, F., & Rezai-Nejad, Y. (1988). Effect of sulfur treatments on yield and uptake of Fe, Zn and Mn by corn, sorghum and soybeans. Journal of Plant Nutrition, 11(6-11), 1353–1360. https://doi.org/10.1080/01904168809363892

Kaplan, M., & Orman, S. (1998). Effect of elemental sulfur and sulfur-containing waste in a calcareous soil in Turkey. *Journal of Plant Nutrition*, 21(8), 1655–1665.

Knudsen, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis.* Part 2. Chemical and Microbiological Properties (pp. 225–246).

Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science*

Society of America Journal, 42(3), 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

Lou, L., Kang, J., Pang, H., Li, Q., Du, X., Wu, W., Chen, J., & Lv, J. (2017). Sulfur protects pakchoi (Brassica chinensis L.) seedlings against cadmium stress by regulating ascorbate-glutathione metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(8), 1628. https://doi.org/10.3390/ijms18081628

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939. US Government Printing Office.

Orman, S., & Hüseyin, O. (2012). Effects of sulfur and zinc applications on growth and nutrition of bread wheat in calcareous clay loam soil. *African Journal of Biotechnology*, 11(13), 3080–3086.

Orman, Ş., & Kaplan, M. (2009). Determination of sulfur contents in tomato grown in greenhouses in West Mediterranean Region, Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, *21*(1), 484–498.

Safaa, M. M., Khaled, S. M., & Hanan, S. (2013). Effect of elemental sulfur on solubility of soil nutrients and soil heavy metals and their uptake by maize plants. *Journal of American Science*, 9(12), 19–24.

Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi Gardelidani, A., Sadat Hashemi Nasab Zavareh, K., Tolouei, R., Beheshti, M., Avizhgan, A., & Cheraghi, M. (2024). *Methods of soil analysis, sampling, chemical and physical methods*. Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian).

Shahbazi, K., & Besharti, H. (2013). Overview of soil fertility status in Iranian agriculture. *Journal of Land Management*, 1(1), 1–15. https://doi.org/10.22092/lmj.2013.100072. (In Persian).

Slaton, N. A. (1998). The influence of elemental sulfur amendments on soil chemical properties and rice growth. Doctoral dissertation, University of Arkansas.

Tiwari, K. N., & Gupta, B. R. (2006). Sulphur for sustainable high yield agriculture in Uttar Pradesh. *Indian Journal of Fertilizers*, 1(11), 37–52.

Turan, M. A., Taban, S., Katkat, A. V., & Kucukyumuk, Z. (2013). The evaluation of the elemental sulfur and gypsum effect on soil pH, EC, SO4-S and available Mn content. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(1), 572–575.

Usmani, M. M., Nawaz, F., Majeed, S., Shehzad, M. A., Ahmad, K. S., Akhtar, G., Aqib, M., & Shabbir, R. N. (2020). Sulfate-mediated drought tolerance in maize involves regulation at physiological and biochemical levels. *Scientific Reports*, 10(1), 1147. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58169-2

Wainwright, M., Nevell, W., & Grayston, S. J. (1986). Effects of organic matter on sulphur oxidation in soil and influence of sulphur oxidation on soil nitrification. *Plant and Soil*, 96(3), 369–376. https://doi.org/10.1007/BF02375141

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. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

Watkinson, J., & Blair, G. J. (1993). Modelling the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer Research*, 35(1), 115–126. https://doi.org/10.1007/BF00750225

Williams, K. P., & Kelly, D. P. (2013). Proposal for a new class within the phylum Proteobacteria, Acidithiobacillia classis nov., with the type order Acidithiobacillales, and emended description of the class Gammaproteobacteria. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63(8), 2901–2906. https://doi.org/10.1099/ijs.0.049270-0

Wu, Y., Leng, Z., Li, J., Jia, H., Yan, C., Hong, H., Wang, Q., Lu, Y., & Du, D. (2022). Increased fluctuation of sulfur alleviates cadmium toxicity and exacerbates the expansion of Spartina alterniflora in coastal wetlands. *Environmental Pollution*, 292, 118399. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118399

Zahid, A., Din, K. U., Ahmad, M., Hayat, U., Zulfiqar, U., Askri, S. M. H., Anjum, M. Z., Maqsood, M. F., Aijaz, N., Chaudhary, T., & Ali, H. M. (2024). Exogenous application of sulfur-rich thiourea (STU) to alleviate the adverse effects of cobalt stress in wheat. *BMC Plant Biology*, 24(1), 126. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04795-1

Zhao, C., Degryse, F., Gupta, V., & McLaughlin, M. J. (2015). Elemental sulfur oxidation in Australian cropping soils. *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 89–96. https://doi.org/10.2136/sssaj2014.08.0314

Zhao, C., Wang, J., Zang, F., Tang, W., Dong, G., & Nan, Z. (2022). Water content and communities of sulfur-oxidizing bacteria affect elemental sulfur oxidation in silty and sandy loam soils. *European Journal of Soil Biology*, 111, 103419. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103419