



Publisher: Soil Science Society of Iran

**Journal of Soil Research**  
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


## The Effect of Moisture on the Sulfur Oxidation and Some Chemical Properties of Saline and Non-Saline Soils

Jalal Ghaderi<sup>a\*</sup>, Mohammad Hossein Davoodi<sup>b</sup>, Neda Mohammadi<sup>c</sup>, and Kamal Khalkhal<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran.

<sup>b</sup> Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

<sup>c</sup> Soil and Water Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran.

### Article Info

**Article Type**  
Research Article

**Received**  
August 12, 2025  
**Revised**  
November 26, 2025  
**Accepted**  
December 06, 2025  
**Published online**  
December 20, 2025

**Keywords**  
Moisture,  
Oxidation,  
Soil Salinity,  
*Thiobacillus*,  
Vermicompost

**\*Corresponding author's email**  
[ghaderijalal@gmail.com](mailto:ghaderijalal@gmail.com)

### Extended Abstract

**Background and Objectives:** Sulfur is the fourth most essential and commonly required nutrient for all living organisms, including plants, animals, humans, and microorganisms. The effectiveness of elemental sulfur depends on its degree of oxidation, a process driven by both chemical and biological mechanisms. Various soil variables, such as pH, texture, temperature, moisture content, and salinity can influence sulfur oxidation in soils. Globally, and particularly in Iran, soil salinity poses a significant threat to agricultural productivity and food security. In Iran, more than 50% of soils are affected by salinity constraints. Soil moisture is also a critical variable for the biological oxidation of sulfur. However, the interactive effects of soil moisture and salinity on sulfur-oxidizing microbial communities and the oxidation process remain unclear. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of sulfur application under different moisture conditions on sulfur oxidation and on selected chemical properties of six soil series with varying characteristics and salinity levels.

**Materials and Methods:** In this study, numerous soil samples were collected from across the country (Iran) at a depth of 0–30 cm. Following chemical analysis, six soil samples with different salinity levels were selected. The effects of two moisture contents (40% and 60% of saturation) and three sulfur application rates (0, 500, and 1000 kg/ha), sourced from the Research Institute of Petroleum Industry, along with the bacterium *Thiobacillus*, were evaluated. The experiment was conducted in a completely randomized block design with three replicates for each treatment, and incubated for one year at a constant temperature of 25°C in the incubation chamber of the Soil and Water Research Institute laboratory.

**Results:** The results indicated that in non-saline and slightly saline soils (electrical conductivity less than 4 dS/m), sulfur application significantly decreased soil pH and increased electrical conductivity, as well as the availability of phosphorus, iron, zinc, and sulfate. The most pronounced reduction in pH and enhancement of nutrient availability in these soils were observed in the treatment with 1000 kg S/ha under 40% moisture saturation. In contrast, in highly saline soils (electrical conductivity greater than 8 dS/m), the effect of sulfur on these properties was markedly limited and, in most cases, non-significant. Furthermore, the highest rate of sulfur oxidation across all soil types was recorded in the 500 kg S/ha treatment under 40% moisture. Increasing the moisture level to 60% led to a reduction in the oxidation rate across all salinity levels, attributable to decreased oxygen availability and suppressed microbial activity. The highest sulfur oxidation rate ( $195.5 \mu\text{g S cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) was measured in the saline Lenjan soil, while the lowest rate ( $2.4 \mu\text{g S cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) was recorded in the highly saline Jazoushi soil on the 25th day of incubation.

**Conclusion:** These results highlight sulfur's potential as an effective amendment for improving chemical properties in non-saline, and mildly saline soils. For saline soils, pre-treatment methods such as leaching are strongly recommended to enhance sulfur's effectiveness.

---

**Cite this article:** Ghaderi, J., Davoodi, M.H., Mohammadi, N., Khalkhali, K., 2025. The Effect of Moisture on the Sulfur Oxidation and Some Chemical Properties of Saline and Non-Saline Soils. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 303-320.



**DOI:** [10.22092/IJSR.2025.370175.782](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370175.782)

**Publisher:** Soil Science Society of Iran

---



## تأثیر رطوبت بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و غیر شور

جلال قادری<sup>۱\*</sup>، محمدحسین داوودی<sup>۲</sup>، ندا محمدی<sup>۳</sup> و کمال خلخال<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران.

<sup>۲</sup> مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

<sup>۳</sup> بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

### واژه‌های کلیدی

اکسایش،

تیوباسیلوس،

رطوبت خاک،

شوری خاک،

ورمی کمپوست

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد همزمان گوگرد (۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و باکتری تیوباسیلوس، در دو سطح رطوبتی متفاوت (۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع) بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی شش نوع خاک با سطوح متفاوت شوری انجام شد. نتایج نشان داد که در خاک‌های غیرشور و کم‌شور (EC کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر)، کاربرد گوگرد به طور معنی‌داری باعث کاهش pH و افزایش EC، فسفر، آهن، روی و سولفات قابل جذب خاک گردید. بیشترین کاهش pH و افزایش غلظت عناصر غذایی در این خاک‌ها در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد و رطوبت ۴۰ درصد مشاهده شد. در مقابل، در خاک‌های با شوری بالا (EC بیشتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر)، تأثیر گوگرد بر این ویژگی‌ها بسیار محدود و در اغلب موارد غیرمعنی‌دار بود. بیشترین میزان اکسایش گوگرد در کلیه خاک‌ها در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار گوگرد و رطوبت ۴۰ درصد ثبت شد. افزایش رطوبت به ۶۰ درصد، به دلیل کاهش اکسیژن و فعالیت میکروبی، موجب کاهش سرعت اکسایش در تمامی سطوح شوری گردید. بیشترین نرخ اکسایش گوگرد (۱۹۵/۵ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در روز) در خاک لنجان (شور) و کمترین نرخ (۲/۴ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع در روز) در خاک جذوشی (شدیداً شور) و در روز ۲۵ انکوباسیون اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که گوگرد می‌تواند به عنوان یک اصلاح کننده مؤثر برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک، به ویژه در خاک‌های غیرشور و با شوری کم، مورد استفاده قرار گیرد. با این حال در خاک‌های شور، پیش تصفیه (مانند شست‌وشو) برای افزایش کارایی گوگرد توصیه می‌شود.

\*ایمیل نویسنده مسئول

[ghaderijalal@gmail.com](mailto:ghaderijalal@gmail.com)

استناد: قادری، ج.، داوودی، م.ج.، محمدی، ن.، خلخال، ک. ۱۴۰۴. تأثیر رطوبت بر اکسایش گوگرد و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و

غیرشور. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۳۲۰-۳۰۳.

DOI:10.22092/IJSR.2025.370175.782



## مقدمه

شوری خاک یک تهدید جدی برای تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی در سطح دنیاست (Shahbazi et al., 2024). شوری با ایجاد تنش اسمزی، سمیت یون‌های خاص (مانند سدیم و کلر) و اختلال در جذب آب و عناصر غذایی، اثرات منفی شدیدی بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک گذاشته و در نهایت منجر به کاهش رشد و بهره‌وری محصولات می‌شود. در ایران نیز از ۱۸/۵ میلیون هکتار اراضی قابل کشت، ۸ میلیون هکتار اراضی آبی بوده که ۶/۸ میلیون هکتار آن به درجات مختلف شوری مبتلا هستند. از این میزان، ۴/۳ میلیون هکتار فقط محدودیت شوری دارند و ۲/۵ میلیون هکتار افزون بر شوری دارای محدودیت‌های مربوط به ویژگی‌های ذاتی خاک (بافت، عمق، ضریب آب‌گذری، نفوذپذیری)، پستی و بلندی، فرسایش خاک و آب زیرزمینی نیز هستند (Shahbazi et al., 2024). برای مقابله با این چالش، راهکارهای مختلفی از جمله شستشوی خاک، استفاده از مواد آلی و کاربرد اصلاح‌کننده‌های شیمیایی مختلف مانند سولفات کلسیم (ژپس)<sup>۱</sup>، اسیدسولفوریک و گوگرد عنصری به ارائه شده است. در میان این روش‌ها، استفاده از گوگرد عنصری به دلیل هزینه پایین، در دسترس بودن و قابلیت تبدیل به اسیدسولفوریک، به عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و قلیایی مورد توجه قرار گرفته است.

گوگرد یک عنصر غذایی ضروری برای گیاهان است که در تشکیل اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها و سولفولیپیدها نقش دارد (Hammerschmidt et al., 2024). گوگرد و مشتقات آن نقش محافظتی در برابر تنش‌های غیرزیستی دارند (Islam et al., 2024). گیاهان برای سنتز سیستم‌های گوگرد نیاز دارند که به عنوان دهنده یا پیش‌ساز مواد حیاتی مانند متیونین، گلوتاتیون و سایر ترکیبات حاوی گوگرد عمل می‌کند (Li Q., 2020; Yadav et al., 2021). رایج‌ترین کودهای گوگردی مورد استفاده، بر پایه سولفات ( $\text{SO}_4\text{-S}$ ) یا گوگرد عنصری ( $\text{S}^0$ ) هستند؛ اما برخلاف کودهای سولفاتی (مانند سولفات آمونیوم) که به راحتی می‌توانند از ناحیه ریشه شسته شوند، گوگرد عنصری در خاک محلول نیست و در نتیجه تحت آبشویی قرار نمی‌گیرد. از آنجا که گوگرد عنصری فاقد ماده حامل (مانند یون آمونیوم یا کلسیم) است و درصد خلوص بالایی دارد، مقدار ماده مورد نیاز برای حمل و نقل و کاربرد در واحد سطح به طور قابل توجهی در مقایسه با منابع سولفاتی کاهش می‌یابد که این امر منجر به صرفه‌جویی در هزینه می‌شود (Degryse et al., 2021). با این حال، برای اینکه برای جذب گیاه در دسترس باشد، باید به سولفات اکسید شود. برای حل شدن

گوگرد عنصری و اکسایش آن، به باکتری‌هایی نیاز است که بتوانند آن را به سولفات‌های قابل دسترس برای گیاه ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) اکسید کنند (Degryse et al., 2021). چندین گونه خاص از باکتری‌های خاکری، مانند جنس تیوباسیلوس (Germida and Janzen, 1993) اکسایش گوگرد را تسهیل می‌کنند و فراوانی نسبی آن‌ها به محتوای گوگرد خاک پاسخ مثبت می‌دهد (Zhao et al., 2022).

متغیرهای خاکی متنوعی مانند pH، بافت خاک، دما، میزان آب و شوری خاک می‌توانند بر اکسایش گوگرد در خاک تأثیر داشته باشد (Zhao et al., 2022). با این حال، چگونگی تعامل محتوای آب و شوری خاک برای تأثیرگذاری بر جوامع میکروبی اکسیدکننده گوگرد و اکسایش گوگرد مشخص نیست. شوری مسئله‌ای است که طی سال‌های گذشته در مناطق مختلفی در جهان در حال گسترش بوده و تولید محصولات کشاورزی کاهش داده است (de Souza Freitas et al., 2019). میزان آب خاک نیز یک متغیر حیاتی برای اکسایش زیستی گوگرد است. هنگامی که میزان آب خاک کم است، به دلیل کمبود آب، 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 و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای که با هدف بررسی تأثیر هم‌زمان بافت خاک و رطوبت بر فعالیت جامعه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و نرخ اکسایش انجام شد، گزارش کردند که در دو سطح رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد ظرفیت نگهداری آب، میزان اکسایش در خاک لوم شنی به طور قابل توجهی بالاتر از خاک لوم سیلتی بود. آن‌ها این نتیجه را به تهویه بهتر و دسترسی بیشتر به اکسیژن در خاک‌های با بافت سبک‌تر نسبت دادند. همچنین در خاک لوم شنی، سرعت اکسایش با افزایش میزان رطوبت از ۴۰ به ۶۰ درصد افزایش یافت که حاکی از رسیدن به نقطه بهینه رطوبتی برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها در آن بافت خاص بود. Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) در یک مطالعه پایه گزارش کردند که با کاربرد گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی (۴۰ و ۶۰ درصد) در خاک‌های معمولی، pH، کاهش، هدایت الکتریکی، فسفر، آهن و روی قابل جذب، سولفات محلول خاک افزایش یافت و رطوبت ۴۰ درصد به عنوان شرایط بهینه شناسایی شد.

<sup>1</sup> Gypsum

## مواد و روش‌ها

## محل مطالعه و تهیه نمونه‌های خاک

در این پژوهش ابتدا ۳۴ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتری سطح خاک‌های مختلف کشور جمع‌آوری شد. مشخصات محل نمونه‌برداری و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سری خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. این خاک‌ها در پنج دسته خاک غیر شور با هدایت الکتریکی کمتر از ۲ dS/m (خاک‌های دره بید و کم سرخ)، خاک کم شور با هدایت الکتریکی ۲ تا ۴ dS/m (خاک بوشگان)، خاک شور با هدایت الکتریکی ۴ تا ۸ dS/m (خاک لنجان)، خاک خیلی شور با هدایت الکتریکی ۸ تا ۱۶ dS/m (خاک ابراهیم آباد) و خاک شدید شور با هدایت الکتریکی بیش از ۱۶ dS/m (خاک جذوشی) تقسیم‌بندی شدند (جدول ۱).

اگرچه مطالعات متعددی اثر رطوبت بر اکسایش گوگرد در خاک‌های غیرشور را بررسی کرده‌اند، اما پاسخ فرایندهای شیمیایی و میکروبی مرتبط با اکسایش گوگرد در خاک‌های با درجات مختلف شوری، به‌ویژه در شرایط رطوبتی متفاوت، هنوز به‌طور کامل شناخته‌نشده است. در بسیاری از مناطق کشاورزی ایران، شوری خاک به‌عنوان یک چالش اساسی در کاهش بهره‌وری محسوب می‌شود، اما تأثیر متقابل شوری و رطوبت بر کارایی اصلاح‌کننده گوگرد به‌خوبی بررسی نشده است. این خلأ دانشی، نیاز به مطالعه‌ای جامع در این زمینه را آشکار می‌سازد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی هم‌زمان تأثیر سطوح مختلف شوری خاک و رطوبت بر کارایی اصلاح‌کننده گوگرد در تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و میزان اکسایش گوگرد است.

جدول ۱- مشخصات منطقه نمونه‌برداری و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش

Table 1. Characteristics of the sampling area and the physical and chemical properties of the studied soils

| مشخصات منطقه           |                         |                     |                 |             |                 |             |            |
|------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|------------|
| Region characteristics |                         |                     |                 |             |                 |             |            |
|                        | Region 1                | Region 2            | Region 3        | Region 4    | Region 5        | Region 6    |            |
| استان                  | اصفهان                  | کرمان               | بوشهر           | اصفهان      | خراسان          | خوزستان     |            |
| Province               | Isfahan                 | Kerman              | Bushehr         | Isfahan     | Khorasan        | Khuzestan   |            |
| منطقه                  | فریدون                  | جیرفت و مسافرآباد   | اراضی پشتکوه    | اصفهان      | دشت اسفراین     | رامهرمز     |            |
| Region                 | Fereydun                | Jiroft & Mosafarabd | Pashkooch Lands | Isfahan     | Esfarayen Plain | Ramhormoz   |            |
| سری                    | دره بید                 | کم سرخ              | بوشگان          | لنجان       | ابراهیم آباد    | جذوشی       |            |
| Series                 | Dareh Bid               | Kam Sorkh           | Bushgan         | Lenjan      | Ebrahim Abad    | Jadushi     |            |
| عرض جغرافیایی          | 50° 27' 37"             | 57° 53' 06"         | 51° 42' 15"     | 52° 00' 50" | 40° 90' 60.2"   | 49° 31' 02" |            |
| Latitude               |                         |                     |                 |             |                 |             |            |
| طول جغرافیایی          | 33° 04' 56.4"           | 28° 06' 36"         | 28° 47' 53"     | 32° 34' 03" | 50° 83' 50"     | 31° 13' 33" |            |
| Longitude              |                         |                     |                 |             |                 |             |            |
| خصوصیات خاک            |                         |                     |                 |             |                 |             |            |
| Soil properties        |                         |                     |                 |             |                 |             |            |
| pH (1:2.5)             | -                       | 7.65                | 7.97            | 7.69        | 7.82            | 8.00        | 8.06       |
| EC                     | dS m <sup>-1</sup>      | 0.11                | 1.15            | 2.67        | 8.60            | 12.66       | 18.60      |
| OC                     | %                       | 0.54                | 0.25            | 0.88        | 0.56            | 0.22        | 0.70       |
| P                      | mg kg <sup>-1</sup>     | 20.2                | 12.6            | 3.5         | 13.00           | 4.40        | 1.00       |
| Fe                     | mg kg <sup>-1</sup>     | 8.2                 | 3.00            | 6.00        | 6.3             | 4.40        | 0.80       |
| Zn                     | mg kg <sup>-1</sup>     | 0.5                 | 0.5             | 0.5         | 0.6             | 0.4         | 0.6        |
| CEC                    | meq 100 g <sup>-1</sup> | 23.4                | 11.2            | 14.6        | 14.2            | 11.4        | 9.2        |
| CCE                    | %                       | 14.9                | 16.6            | 49.9        | 34.3            | 21.00       | 17.00      |
| S                      | mg kg <sup>-1</sup>     | 2.00                | 116.00          | 356.25      | 827.5           | 912.5       | 540.00     |
| SP                     | %                       | 38.00               | 28.00           | 47.00       | 41.00           | 39.00       | 44.00      |
| بافت                   | -                       | Silty Clay          | Loam            | Silty Clay  | Silty Clay Loam | Clay Loam   | Sandy Loam |
| Texture                |                         |                     |                 |             |                 |             |            |

## طرح آزمایشی

آزمایش به صورت طرح فاکتوریل دو فاکتور بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار برای هر تیمار انجام شد. فاکتور اول سطح مصرف گوگرد (۰ (شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) و فاکتور دوم رطوبت خاک در دو سطح (۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع) بود. این آزمایش، به مدت یک سال، در درجه حرارت ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در اتاقک انکوباتور آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب در کرج بررسی شد.

## آنالیز شیمیایی خاک

نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در آزمایشگاه تعیین شد. برای تجزیه نمونه‌های خاک، بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962) pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱:۲/۵ (Shahbazi et al., 2024)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور (Bawer et al., 1952)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون با اسید (Allison and Moodie, 1965)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996)، غلظت نیتروژن کل به روش کج‌دال (TN) (Bremner, 1996)، غلظت فسفر قابل جذب به روش بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار (Olsen, 1954)، غلظت پتاسیم قابل جذب با عصاره‌گیر استات آمونیوم (Knudsen et al., 1982)، غلظت آهن، روی، منگنز و مس قابل استخراج با عصاره‌گیر DTPA (Lindsay and Norvell, 1978)، غلظت سولفات قابل جذب با استفاده از روش Chesnin و Yien (1951) اندازه‌گیری شدند.

## اعمال تیمار و انکوباسیون

برای انجام آزمایش، ابتدا مقدار ۸۰۰ گرم خاک هوا خشک در داخل ظرف‌های پلاستیکی ۱۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس نسبت به اعمال تیمارهای کودی همراه با باکتری تیوباسیلوس اقدام شد. در این آزمایش به ازای هر ۵۰ کیلوگرم کود گوگرد مصرفی، یک کیلوگرم باکتری تیوباسیلوس از گونه *T. neapolitanus* 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 اضافه شد. در تمامی تیمارها، از جمله شاهد، مقدار برابر ورمی‌کمپوست و سوسپانسیون باکتری تیوباسیلوس مطابق با پروتکل استاندارد به خاک افزوده شد تا اثر هر دو عامل در بین تیمارها یکسان باشد و تنها تفاوت بین سطوح مختلف گوگرد و مقادیر رطوبت بررسی شود. این کار با دو هدف اصلی انجام گرفت: الف) فراهم کردن یک منبع پایه کربن و انرژی برای تضمین بقا و فعالیت اولیه جمعیت باکتریایی (*Thiobacillus*) در تمام خاک‌ها، صرف نظر از حاصلخیزی اولیه متفاوت آن‌ها. ب) خنثی کردن اثرات احتمالی تفاوت در ماده آلی اولیه، به عبارت دیگر با اضافه کردن یک منبع آلی یکسان به همه تیمارها، باعث می‌شود که هر تغییر مشاهده شده در پارامترها (مانند pH، EC، اکسایش گوگرد) را با اطمینان بیشتری به اثر متقابل شوری، رطوبت و گوگرد نسبت داد، نه به تفاوت در مواد آلی خاک؛ بنابراین، ورمی‌کمپوست و باکتری تیوباسیلوس به عنوان شرایط ثابت و ضروری برای اجرای صحیح آزمایش در نظر گرفته شده و نقش آن‌ها تضمین این است که فرایند اکسایش گوگرد (که محور اصلی مطالعه است) به دلیل کمبود مواد آلی یا جمعیت باکتریایی، محدود نشود. برخی خصوصیات شیمیایی ورمی‌کمپوست مصرفی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- برخی خصوصیات شیمیایی ورمی‌کمپوست مورد استفاده

Table 2. Selected chemical properties of the used vermicompost

| پارامتر<br>Parameter                            | مقدار<br>Value | واحد<br>Unit |
|-------------------------------------------------|----------------|--------------|
| pH                                              | 7.54           | -            |
| قابلیت هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity) | 17.58          | dS/m         |
| رطوبت (Moisture)                                | 7.29           | %            |
| نیتروژن کل (Total N)                            | 1.55           | %            |
| OC                                              | 24.88          | %            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                   | 1.37           | %            |
| K <sub>2</sub> O                                | 0.24           | %            |
| Fe                                              | 11978          | mg/kg        |
| Zn                                              | 239            | mg/kg        |
| Pb                                              | 44.5           | mg/kg        |
| Cd                                              | 3.00           | mg/kg        |
| گوگرد محلول (Soluble S)                         | 0.089          | %            |
| گوگرد کل (Total S)                              | 0.67           | %            |

## تجزیه و تحلیل آماری

برای انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار 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

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

اکسایش گوگرد فرایند تشکیل  $SO_4^{2-}$  با اکسایش  $S^0$ ،  $H_2S$  و سولفید ( $S^{2-}$ ) توسط برخی از میکروب‌های اکسید کننده گوگرد است (Chaudhary et al., 2023). گوگرد عنصری ابتدا به صورت آنزیمی به سولفید یا سولفیت تبدیل می‌شود و سپس به شکل نهایی سولفات اکسید می‌شود. اکسایش زیستی گوگرد طبق رابطه  $S \rightarrow S_2O_2^{3-} \rightarrow S_4O_2^{6-} \rightarrow SO_4^{2-}$  انجام می‌شود (Chaudhary et al., 2023). مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش سطح مصرف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی، مقدار اکسایش گوگرد به طور معنی‌دار کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). بیشترین مقدار اکسایش با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در شرایط ۴۰ درصد رطوبت اشباع مشاهده شد. اکسایش در مدت زمان ۲۵ روز به اوج رسید و سپس کاهش یافت. کمترین و بیشترین مقدار اکسایش در بین شش نمونه خاک مورد آزمایش به ترتیب در خاک‌های جذوشی و لنجان به مقدار ۲/۴ و ۱۹۵/۵ میکروگرم گوگرد بر سانتی‌متر مربع در روز مشاهده شد (جدول ۳). در این تحقیق مقدار اکسایش در خاک‌های با شوری کمتر از ۸، بیش‌تر از خاک‌های شورتر بود که ممکن است ناشی از شرایط مناسب برای فعالیت ریزجانداران اکسید کننده گوگرد باشد.

در این مطالعه، پاسخ اکسایش گوگرد به سطوح مختلف مصرف، خطی نبود. در بیشتر خاک‌ها (به جز دره بید)، حداکثر نرخ اکسایش در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد و با افزایش میزان مصرف به ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار، از کارایی اکسایش کاسته شد (جدول ۳). این الگوی غیر خطی می‌تواند ناشی از چندین مکانیسم بازدارنده در سطوح بالای گوگرد باشد. اولاً، تجمع سریع اسید سولفوریک و متعاقب آن کاهش شدید pH موضعی در اطراف ذرات گوگرد می‌تواند به طور مستقیم برای جمعیت باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد سمی باشد و فعالیت متابولیک آن‌ها را مهار کند (Germida and Janzen, 1993). ثانیاً، افزایش غلظت یون‌های سولفات و دیگر املاح محلول می‌تواند با ایجاد استرس اسمزی، فشار مضاعفی بر میکروارگانیسم‌ها وارد آورد. ثالثاً، در سطوح بسیار بالای گوگرد، امکان تشکیل لایه‌ای از مواد حد واسط اکسایش (مانند تیوسولفات) بر سطح ذرات گوگرد وجود دارد که این لایه به عنوان یک سد فیزیکی از

گوگرد مصرفی در پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شده بود. گوگرد پاستیل، یک نوع کود گوگردی گرانوله به رنگ سبز متمایل به زرد بود که حاوی ۱۲ درصد رس بنتونیت و ۸۸ درصد گوگرد بود. با استفاده از پیست فاین جت، آب مقطر به نمونه‌های خاک اضافه تا به رطوبت موردنظر بر اساس تیمارهای رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع برسند. به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت و در عین حال حفظ امکان تبادلات گازی، سطح خاک گلدان‌ها با پارافیلیم پوشانده و چند سوراخ کوچک برای تهویه ایجاد شد. سپس ظرف‌ها در دمای مورد نظر در انکوباتور نگهداری شدند. کنترل رطوبت به وسیله روش وزنی و در فواصل ۴۸ الی ۷۲ ساعت انجام شد.

## اندازه‌گیری‌ها

در پایان هر دوره انکوباسیون که شامل زمان‌های برداشت تعیین شده (مانند ۰، ۳، ۷، ۱۵، ۲۵ و ... روز پس از آغاز آزمایش) بود، 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 جذب با استفاده روش‌های مذکور در بخش آنالیز شیمیایی خاک در زمان‌های صفر، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۳۶۰ روز اندازه‌گیری شدند. غلظت سولفات قابل جذب در زمان‌های صفر، ۲۵، ۶۰ و ۳۶۰ روز به وسیله روش توریدومتری (Chesnin and Yien, 1951) و میزان اکسایش گوگرد، در زمان‌های ۲۵، ۶۰ و ۳۶۰ روز با استفاده از معادله پیدشنهادی توسط Bettany و Janzen (1987) محاسبه شد (رابطه ۱).

$$K = (1 - (1 - m/m_0)^{1/3}) Z Do / 2t \quad (1) \text{ رابطه } (1)$$

-  $K$ : 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).

-  $m_0$ : جرم گوگرد (میکروگرم) در زمان اولیه هر دوره نگهداری در انکوباتور.

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

-  $t$ : زمان نگهداری در انکوباتور (روز).

-  $Do$ : قطر ذرات گوگرد در شروع هر دوره نگهداری در انکوباتور (۰/۰۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد).

تماس مستقیم باکتری‌ها با سوبسترای اصلی ( $S^0$ ) جلوگیری می‌کند و از این طریق نرخ اکسایش را محدود می‌سازد (Janzen and Bettany, 1987). این یافته که اکسایش در سطوح بالا به نقطه اشباع می‌رسد یا کاهش می‌یابد، با مشاهدات گزارش شده در مطالعات قبلی همسو بود (Ghaderi et al., 2019; Modaihsh et al., 1989) و تأکیدی بر این مفهوم است که کاربرد گوگرد برای دستیابی به حداکثر کارایی، دوز بهینه دارد و مصرف بی‌رویه آن می‌تواند نتایج معکوس به همراه داشته باشد.

در یک آزمایش گلخانه‌ای گزارش شد که بهترین تیمار از لحاظ کاهش pH خاک و سولفات تولیدی، کاربرد ۲ تن بر هکتار گوگرد بود و سطوح بیش‌تر از آن تأثیری در مقدار گوگرد اکسیده شده نداشت (Kasraian, et al., 2012). نتایج این آزمایش همچنین نشان داد که با افزایش مقدار رطوبت خاک از ۴۰ به ۶۰ درصد رطوبت اشباع، مقدار اکسایش گوگرد در

سطوح مختلف کود گوگرد مصرفی کم‌تر شد. با افزایش محتوای رطوبت خاک، اکسیداسیون گوگرد افزایش یافته و به حد مطلوب می‌رسد، سپس با افزایش مجدد رطوبت به دلیل کاهش اکسیژن در منافذ خاک، از سرعت اکسایش گوگرد کاسته می‌شود. در رطوبت‌های کم‌تر از ظرفیت زراعی به دلیل محدودیت آب برای ریزجانداران اکسید کننده و در رطوبت‌های بالاتر به واسطه کمبود اکسیژن در خاک، اکسیداسیون گوگرد کاهش می‌یابد (Janzen and Bettany, 1987). شوری خاک نیز به دو علت، باعث کاهش سرعت اکسیداسیون گوگرد در خاک می‌شود؛ الف) شوری باعث افزایش پتانسیل (اسمزی) آب در خاک شده و قابلیت دسترسی آب را برای ریزجانداران اکسیدکننده کاهش می‌دهد. ب) غلظت زیاد آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در خاک شور با اثرات سمی که روی ریزجانداران دارد، فعالیت آن‌ها را کند یا متوقف ساخته و بر سرعت اکسایش گوگرد اثر منفی می‌گذارد.

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر مقدار گوگرد در شرایط رطوبتی بر اکسایش گوگرد در زمان‌های مختلف انکوباسیون خاک  
Table 3. Comparison of the mean effect of sulfur rate under different moisture conditions on sulfur oxidation at various soil incubation times

| سری خاک<br>Soil Series       | گوگرد مصرفی<br>Applied Sulfur (kg/ha) | رطوبت اشباع<br>Saturation Moisture (%) | میزان اکسیداسیون گوگرد<br>Sulfur Oxidation Rate ( $\mu\text{g S cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) |         |          |
|------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
|                              |                                       |                                        | 25 days                                                                                      | 60 days | 360 days |
| دره بید<br>Dareh Bid         | 500                                   | 40                                     | 59.0 b                                                                                       | 30.3 b  | 5.3 b    |
|                              |                                       | 60                                     | 50.0 c                                                                                       | 24.7 c  | 5.0 b    |
|                              | 1000                                  | 40                                     | 77.0 a                                                                                       | 41.7 a  | 9.0 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 49.7 c                                                                                       | 25.3 c  | 5.0 b    |
| کم سرخ<br>Kam Sorkh          | 500                                   | 40                                     | 37.6 a                                                                                       | 24.3 a  | 4.6 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 31.0 b                                                                                       | 18.1 b  | 3.5 b    |
|                              | 1000                                  | 40                                     | 23.6 c                                                                                       | 14.0 c  | 2.7 c    |
|                              |                                       | 60                                     | 15.4 d                                                                                       | 9.9 d   | 2.1 d    |
| بوشگان<br>Bushgan            | 500                                   | 40                                     | 35.7 a                                                                                       | 18.3 a  | 2.3 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 22.3 c                                                                                       | 15.0 b  | 2.0 a    |
|                              | 1000                                  | 40                                     | 26.8 b                                                                                       | 15.3 b  | 2.0 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 22.7 c                                                                                       | 11.3 c  | 2.0 a    |
| لنجان<br>Lenjan              | 500                                   | 40                                     | 195.5 a                                                                                      | 74.1 a  | 9.9 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 133.4 b                                                                                      | 54.8 b  | 8.7 b    |
|                              | 1000                                  | 40                                     | 82.9 c                                                                                       | 32.0 c  | 5.1 c    |
|                              |                                       | 60                                     | 73.2 d                                                                                       | 26.5 d  | 4.4 d    |
| ابراهیم آباد<br>Ebrahim Abad | 500                                   | 40                                     | 32.9 a                                                                                       | 9.7 a   | 1.4 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 26.8 a                                                                                       | 9.7 a   | 1.2 a    |
|                              | 1000                                  | 40                                     | 19.1 b                                                                                       | 6.3 ab  | 0.8 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 10.5 c                                                                                       | 3.6 b   | 0.6 a    |
| جذوشی<br>Jadushi             | 500                                   | 40                                     | 5.9 a                                                                                        | 4.5 a   | 1.5 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 4.6 b                                                                                        | 2.0 c   | 0.1 b    |
|                              | 1000                                  | 40                                     | 3.8 b                                                                                        | 2.6 b   | 1.2 a    |
|                              |                                       | 60                                     | 2.4 c                                                                                        | 1.3 c   | 0.2 b    |

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

اگرچه طراحی این مطالعه فاقد تیمارهای کنترلی برای تفکیک سهم جداگانه باکتری و گوگرد بود، اما شواهد قوی از نقش مکمل این دو جزء حکایت دارد. اولاً، تغییرات ناچیز در تیمار شاهد (که حاوی ورمی کمپوست بود) نشان می‌دهد که سهم این

ماده آلی به تنهایی در تغییر پارامترهایی مانند pH و EC کم بوده است. ثانیاً، الگوی مشاهده شده در نرخ اکسایش که با افزایش رطوبت از ۴۰ به ۶۰ درصد (و در نتیجه کاهش اکسیژن) کاهش یافت، به وضوح از ماهیت زیستی-هوازی فرایند اکسایش در این

آزمایش حکایت دارد. این پاسخ فیزیولوژیکی قویاً نشان می‌دهد که جمعیت باکتریایی افزوده شده فعال بوده و سهم غالب در اکسید کردن گوگرد عنصری را داشته است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مشاهده شده عمدتاً حاصل اثر هم‌افزایی گوگرد (به عنوان سوبسترا) و باکتری‌های اکسیدکننده (به عنوان کاتالیزور زیستی) بود.

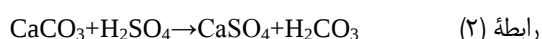
### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر pH خاک

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 شش سری خاک مذکور کاهش یافت (جدول ۴). تحلیل منطقه به منطقه نشان داد که در خاک دره بید بیشترین کاهش pH در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۲۷۰ روز pH از ۷/۸۲ به ۷/۳۱ (۰/۵۱) (واحد) مشاهده شد ( $p < 0.01$ ). در خاک کم سرخ بیشترین کاهش pH در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۱۸۰ روز pH از ۷/۹ به ۷/۴۰ (۰/۵) (واحد) کاهش یافت ( $p < 0.01$ ). خاک‌های دره بید و کم سرخ بیشترین واکنش به گوگرد را نشان دادند که احتمالاً به دلیل شوری پایین و همچنین مقادیر کمتر کربنات کلسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی پایین این دو خاک در مقایسه با سایر خاک‌ها بود. خاصیت بافری خاک به وجود رس، مواد آلی، آهک، ترکیبات فسفردار و بسیاری از ترکیبات شیمیایی دیگر وابسته است. هرگاه مقدار اسید تولید شده در اثر اکسیداسیون گوگرد، توان خنثی کردن عوامل بافری را دارا باشد، pH خاک کاهش می‌یابد (Besharatiet al., 2017). در خاک بوشگان بیشترین کاهش pH در سطح کود ۱۰۰۰ kg/ha، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۶۰ روز (pH) از ۷/۶۴ به ۷/۴۰ (۰/۲۴) (واحد) ثبت شد ( $p < 0.01$ ). در این نوع خاک با توجه به اینکه شوری کم (۲/۶۷) است اما کاهش pH کمتر از خاک‌های دره بید و کم سرخ است که یکی از دلایل آن غیر از شوری می‌تواند آهک بالای این خاک (حدود ۵۰ درصد) باشد.

گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۴۰ روز (pH) از ۷/۷۹ به ۷/۷۶ (۰/۰۳) (واحد کاهش) مشاهده شد ( $p > 0.05$ ). کاهش ناچیز pH احتمالاً به شوری نسبتاً بالا (۶/۸) و همچنین درصد بالای آهک ( $CCE = 34.3\%$ ) مربوط می‌شود که اسید را خنثی می‌کنند؛ بنابراین، در خاک‌های قلیایی و آهکی (لنجان و بوشگان)، گوگرد می‌تواند برای اصلاح pH مفید باشد، اما ممکن است نیاز به مقادیر بیشتر از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار باشد. همانند خاک لنجان، خاک‌های ابراهیم‌آباد (در تیمار ۱۰۰۰

کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۴۰ روز) و جذوشی (در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار، سطح رطوبت ۴۰ درصد و زمان ۶۰ روز) کاهش جزئی pH را شاهد بودند ( $p > 0.05$ ). در خاک‌های با شوری بالا (ابراهیم‌آباد و جذوشی)، کاهش ناچیز pH علیرغم کاربرد گوگرد، می‌تواند به احتمال قوی ناشی از مهار فعالیت میکروبی باشد. 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 (Germida and Janzen, 1993; Zhao et al., 2022). علاوه بر این، ظرفیت بافری بالا در این خاک‌های شور و معمولاً آهکی، اسیدسولفوریک تولید شده از اکسایش محدود را خنثی می‌کند؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که مکانیسم اصلی در این خاک‌ها، کاهش نرخ اکسایش زیستی گوگرد به دلیل استرس شوری و در مرحله بعد، خنثی شدن اسید تولید شده است که در نهایت مانع از کاهش قابل توجه pH می‌گردد؛ بنابراین توصیه می‌شود در خاک‌های شور قبل از مصرف گوگرد، روش‌های دیگر اصلاح (مانند شست‌وشو) استفاده شود تا شوری مانع اکسایش گوگرد نشود.

در روز ۳۶۰، pH خاک در تمامی تیمارها شروع به افزایش کرد که این موضوع نشان‌دهنده اثر موقتی اصلاح گوگردی و غلبه تدریجی ظرفیت بافری خاک است. مکانیسم احتمالی این بازگشت pH می‌تواند شامل مصرف تدریجی اسیدسولفوریک تولید شده در واکنش با اجزای بافری خاک، به ویژه کربنات‌های کلسیم (آهک) باشد. واکنش‌های خنثی‌سازی زیر (رابطه ۲ و ۳) می‌توانند دلیل این پدیده باشند:



در این واکنش‌ها، اسیدسولفوریک قوی ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) با کربنات کلسیم که یک جزء بافری اصلی در خاک‌های آهکی ایران است، واکنش داده و به اسیدکربنیک ضعیف‌تر ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) و گچ ( $\text{CaSO}_4$ ) تبدیل می‌شود. اسیدکربنیک نیز به نوبه خود به آب و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شود که از خاک متصاعد می‌شود. در نتیجه، یون هیدروژن ( $\text{H}^+$ ) از سیستم حذف شده و pH افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مواد 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 موقتی بودن اثر اصلاح گوگردی در صورت عدم مصرف مداوم آن تأکید دارد. کاهش pH و افزایش اسید تولید شده در خاک‌های غیر شور و شوری پایین در اثر اکسایش گوگرد است به عبارت دیگر در حضور باکتری‌های تیوباسیلوس، گوگرد در خاک اکسید شده و با تولید اسیدسولفوریک

باعث کاهش pH خاک می‌شود. نتایج این تحقیق مبنی بر کاهش نرخ اکسایش گوگرد و در نتیجه، کاهش محدودتر pH در رطوبت ۶۰ درصد نسبت به رطوبت ۴۰ درصد، با یافته‌های مطالعات پیشین همچون Nelson و Tisdale (۱۹۵۸)، Kalbasi و همکاران (۱۹۸۸)، Kaplan و Orman (۱۹۹۸)، Orman و Kaplan (۲۰۰۹)، Hüseyin و Orman (۲۰۱۲)، Hashemimajd و همکاران (۲۰۱۲) و Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) همسو است. مکانیسم این پدیده بدین‌صورت 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 اسیدسولفوریک کاهش یافته و بنابراین، میزان کاهش pH نیز کمتر خواهد بود. الگوی مشاهده شده در داده‌های این پژوهش که نشان می‌دهد کاهش pH در تیمارهای با رطوبت ۶۰ درصد کمتر از تیمارهای با رطوبت ۴۰ درصد بود.

جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر pH خاک

Table 4. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil pH.

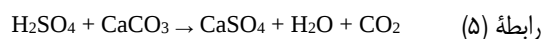
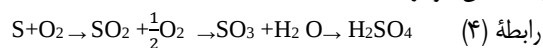
| Sulfur (kg/ha)            | SP (%) | 3 day     | 7 day    | 15 day   | 25 day   | 40 day   | 60 day   | 120 day  | 180 day  | 270 day | 360 day  |
|---------------------------|--------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| Dareh Bid دره بید         |        |           |          |          |          |          |          |          |          |         |          |
| 0                         | 40     | 7.88 ab   | 7.87 ab  | 7.85 ab  | 7.85 a   | 7.83 a   | 7.81 ab  | 7.80 a   | 7.79 a   | 7.82 a  | 7.85 a   |
|                           | 60     | 7.92 a    | 7.91 a   | 7.89 a   | 7.88 a   | 7.86 a   | 7.84 a   | 7.82 a   | 7.81 a   | 7.84 a  | 7.88 a   |
| 500                       | 40     | 7.85 ab   | 7.84 abc | 7.80 bc  | 7.75 bc  | 7.72 bc  | 7.67 cd  | 7.62 c   | 7.53 c   | 7.47 c  | 7.52 c   |
|                           | 60     | 7.90 ab   | 7.88 a   | 7.85 ab  | 7.82 ab  | 7.78 ab  | 7.74 bc  | 7.71 b   | 7.63 b   | 7.57 b  | 7.65 b   |
| 1000                      | 40     | 7.94 ab   | 7.79 bc  | 7.73 cd  | 7.67 c   | 7.57 d   | 7.45 e   | 7.36 e   | 7.32 d   | 7.31 d  | 7.39 d   |
|                           | 60     | 7.87 ab   | 7.84 abc | 7.79 bc  | 7.74 bc  | 7.68 c   | 7.60 d   | 7.51 d   | 7.46 c   | 7.40 c  | 7.54 c   |
| Kam Sorkh کم سرخ          |        |           |          |          |          |          |          |          |          |         |          |
| 0                         | 40     | 7.99 a    | 7.97 ab  | 7.96 ab  | 7.96 ab  | 7.94 ab  | 7.93 a   | 7.92 a   | 7.90 ab  | 7.93 a  | 7.97 ab  |
|                           | 60     | 8.03 a    | 8.02 a   | 8.00 a   | 7.99 a   | 7.98 a   | 7.96 a   | 7.94 a   | 7.93 a   | 7.96 a  | 8.00 a   |
| 500                       | 40     | 7.98 a    | 7.96 ab  | 7.93 ab  | 7.88 b   | 7.81 c   | 7.75 b   | 7.68 b   | 7.75 c   | 7.83 b  | 7.92 b   |
|                           | 60     | 8.03 a    | 8.01 c   | 7.97 a   | 7.93 ab  | 7.87 bc  | 7.81 b   | 7.73 b   | 7.83 b   | 7.92 a  | 7.99 ab  |
| 1000                      | 40     | 7.97 a    | 7.95 ab  | 7.88 bc  | 7.98 c   | 7.71 d   | 7.64 c   | 7.51 c   | 7.40 e   | 7.54 d  | 7.74 d   |
|                           | 60     | 8.00 a    | 7.99 ab  | 7.93 ab  | 7.91 ab  | 7.80 c   | 7.73 b   | 7.58 c   | 7.49 d   | 7.65 c  | 7.83 c   |
| Bushgan بوشگان            |        |           |          |          |          |          |          |          |          |         |          |
| 0                         | 40     | 7.72 abcd | 7.71 abc | 7.69 ab  | 7.67 a   | 7.66 ab  | 7.64 ab  | 7.64 a   | 7.65 a   | 7.68 ab | 7.70 ab  |
|                           | 60     | 7.76 a    | 7.75 a   | 7.74 a   | 7.72 a   | 7.70 a   | 7.68 a   | 7.68 a   | 7.69 a   | 7.76 a  | 7.73 a   |
| 500                       | 40     | 7.71 abcd | 7.69 bc  | 7.63 bcd | 7.60 b   | 7.55 c   | 7.49 c   | 7.55 b   | 7.59 b   | 7.63 b  | 7.67 abc |
|                           | 60     | 7.74 ab   | 7.73 ab  | 7.69 ab  | 7.66 a   | 7.62 b   | 7.58 b   | 7.64 a   | 7.65 a   | 7.68 ab | 7.70 ab  |
| 1000                      | 40     | 7.69 bcd  | 7.66 cd  | 7.55 de  | 7.51 c   | 7.45 d   | 7.40 d   | 7.47 c   | 7.54 b   | 7.56 c  | 7.60 c   |
|                           | 60     | 7.72 abc  | 7.70 abc | 7.64 bc  | 7.60 b   | 7.54 c   | 7.50 c   | 7.56 b   | 7.58 b   | 7.64 b  | 7.63 bc  |
| Lenjan لنجان              |        |           |          |          |          |          |          |          |          |         |          |
| 0                         | 40     | 7.83 ab   | 7.82 ab  | 7.82 ab  | 7.81 abc | 7.79 ab  | 7.79 abc | 7.80 ab  | 7.81 abc | 7.83 ab | 7.84 ab  |
|                           | 60     | 7.88 a    | 7.87 a   | 7.87 a   | 7.86 a   | 7.84 a   | 7.84 a   | 7.85 a   | 7.85 a   | 7.82 ab | 7.87 a   |
| 500                       | 40     | 7.82 ab   | 7.81 ab  | 7.80 ab  | 7.79 abc | 7.78 ab  | 7.79 abc | 7.80 ab  | 7.80 abc | 7.82 ab | 7.83 ab  |
|                           | 60     | 7.88 a    | 7.86 a   | 7.84 a   | 7.82 ab  | 7.81 ab  | 7.83 a   | 7.84 a   | 7.84 a   | 7.85 a  | 7.86 a   |
| 1000                      | 40     | 7.81 ab   | 7.80 ab  | 7.79 ab  | 7.77 bc  | 7.76 abc | 7.77 abc | 7.78 abc | 7.79 abc | 7.80 ab | 7.81 ab  |
|                           | 60     | 7.87 ab   | 7.84 ab  | 7.82 ab  | 7.79 abc | 7.78 ab  | 7.81 ab  | 7.82 ab  | 7.82 ab  | 7.80 a  | 7.83 a   |
| Ebrahim Abad ابراهیم آباد |        |           |          |          |          |          |          |          |          |         |          |
| 0                         | 40     | 8.02 a    | 8.02 a   | 8.00 a   | 8.00 a   | 7.99 a   | 7.98 a   | 8.00 a   | 8.00 a   | 8.00 a  | 8.02 a   |
|                           | 60     | 8.04 a    | 8.04 a   | 8.03 a   | 8.02 a   | 8.00 a   | 7.99 a   | 8.02 a   | 8.03 a   | 8.03 a  | 8.04 a   |
| 500                       | 40     | 8.00 a    | 8.00 a   | 7.98 a   | 7.97 a   | 7.96 a   | 7.96 a   | 7.97 a   | 7.98 a   | 7.99 a  | 8.00 a   |
|                           | 60     | 8.04 a    | 8.03 a   | 8.02 a   | 8.00 a   | 8.00 a   | 8.00 a   | 8.02 a   | 8.03 a   | 8.03 a  | 8.03 a   |
| 1000                      | 40     | 8.00 a    | 7.79 a   | 7.98 a   | 7.96 a   | 7.95 a   | 7.95 a   | 7.96 a   | 7.97 a   | 7.98 a  | 7.99 a   |
|                           | 60     | 8.02 a    | 8.02 a   | 8.02 a   | 8.00 a   | 7.98 a   | 7.99 a   | 8.00 a   | 8.00 a   | 8.02 a  | 8.02 a   |
| Jadushi جدوشی             |        |           |          |          |          |          |          |          |          |         |          |
| 0                         | 40     | 8.23 a    | 8.23 a   | 8.22 a   | 8.22 a   | 8.21 a   | 8.21 a   | 8.21 a   | 8.22 a   | 8.23 a  | 8.23 a   |
|                           | 60     | 8.25 a    | 8.25 a   | 8.24 a   | 8.24 a   | 8.23 a   | 8.23 a   | 8.23 a   | 8.24 a   | 8.25 a  | 8.25 a   |
| 500                       | 40     | 8.22 a    | 8.21 a   | 8.19 a   | 8.16 a   | 8.14 a   | 8.15 a   | 8.15 a   | 8.17 a   | 8.19 a  | 8.21 a   |
|                           | 60     | 8.25 a    | 8.24 a   | 8.23 a   | 8.20 a   | 8.17 a   | 8.18 a   | 8.19 a   | 8.21 a   | 8.22 a  | 8.24 a   |
| 1000                      | 40     | 8.23 a    | 8.22 a   | 8.20 a   | 8.18 a   | 8.18 a   | 8.17 a   | 8.19 a   | 8.20 a   | 8.21 a  | 8.22 a   |
|                           | 60     | 8.24 a    | 8.24 a   | 8.23 a   | 8.21 a   | 8.20 a   | 8.21 a   | 8.22 a   | 8.22 a   | 8.23 a  | 8.24 a   |

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به‌طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

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

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، EC خاک افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار EC مربوط به تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد بود که عمده‌تاً ناشی از تولید و انباشت یون سولفات (حاصل از اکسایش گوگرد) و همچنین آزادسازی یون‌های دیگر در اثر انحلال املاح خاک توسط اسید تولیدشده بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار افزایش EC در سری خاک‌های غیر شور و شوری کم (دره بید، کم سرخ، بوشگان و لنجان) نسبت به خاک‌های شور (ابراهیم‌آباد و جذوشی) بیش‌تر بود که این ناشی از مقدار اکسایش بیش‌تر گوگرد، تولید اسیدسولفوریک، کاهش بیش‌تر pH خاک و در نتیجه حل شدن ترکیبات محلول در خاک است. در بین خاک‌های مختلف، بیشترین میزان افزایش EC مربوط به خاک‌های آهکی بوشگان و لنجان بود که در اثر اکسایش گوگرد در خاک اسیدسولفوریک تولید شده با کربنات‌های کلسیم و منیزیم واکنش داده و موجب انحلال آن‌ها می‌شود (رابطه ۴ و ۵). در نتیجه تشکیل املاح محلول و تشکیل سولفات‌های کلسیم (گچ) و منیزیم در خاک، EC خاک افزایش می‌یابد (Slaton, 1998)؛ بنابراین، علت افزایش EC را می‌توان به تجمع نمک‌های حاصل از اکسایش گوگرد نسبت داد.



افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک در پاسخ به کاربرد گوگرد، به‌طور مستقیم ناشی از فرایند اکسایش زیستی گوگرد و تولید اسیدسولفوریک بود. این اسید ضمن کاهش pH، باعث انحلال ترکیبات معدنی خاک (از جمله کربنات‌ها، فسفات‌ها و اکسیدهای فلزی) شده و مقادیر قابل توجهی از یون‌های محلول نظیر  $\text{SO}_4^{2-}$ ،  $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{Mg}^{2+}$ ،  $\text{Fe}^{2+}$  و  $\text{Zn}^{2+}$  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 بود، به‌طوری‌که 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 و همکاران (۲۰۱۲) و Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) بود 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 بالایی دارد، سهم عمده‌ای در افزایش شوری داشت (Orman and Hüseyin, 2012; El-Kholy et al., 2014).

جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC)

Table 5. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil electrical conductivity (EC).

| Sulfur (kg/ha)            | SP (%) | 3 day    | 7 day    | 15 day   | 25 day   | 40 day   | 60 day  | 120 day  | 180 day  | 270 day  | 360 day  |
|---------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|
| Dareh Bid دره بید         |        |          |          |          |          |          |         |          |          |          |          |
| 0                         | 40     | 0.13 b   | 0.14 b   | 0.16 cd  | 0.18 cd  | 0.19 d   | 0.20 c  | 0.20 de  | 0.21 ef  | 0.21 e   | 0.22 e   |
|                           | 60     | 0.10 b   | 0.12 b   | 0.13 d   | 0.14 d   | 0.15 d   | 0.16 c  | 0.19 e   | 0.18 f   | 0.19 e   | 0.19 e   |
| 500                       | 40     | 0.14 b   | 0.15 b   | 0.17 bcd | 0.22 bcd | 0.29 cd  | 0.34 c  | 0.43 cd  | 0.50 cd  | 0.54 d   | 0.52 cd  |
|                           | 60     | 0.13 b   | 0.14 b   | 0.16 bcd | 0.20 cd  | 0.24 cd  | 0.26 c  | 0.30 cde | 0.37 de  | 0.40 a   | 0.42 d   |
| 1000                      | 40     | 0.16 b   | 0.18 b   | 0.22 bc  | 0.29 bc  | 0.36 c   | 0.46 c  | 0.52 c   | 0.62 c   | 0.67 d   | 0.70 c   |
|                           | 60     | 0.14 b   | 0.15 b   | 0.20 bcd | 0.23 bcd | 0.31 cd  | 0.35 c  | 0.42 cd  | 0.49 cd  | 0.57 d   | 0.62 c   |
| Kam Sorkh کم سرخ          |        |          |          |          |          |          |         |          |          |          |          |
| 0                         | 40     | 0.81 d   | 0.82 d   | 0.84 d   | 0.86 e   | 0.87 d   | 0.90 e  | 0.92 e   | 0.94 f   | 0.96 f   | 0.98 f   |
|                           | 60     | 0.52 c   | 0.54 f   | 0.56 e   | 0.58 f   | 0.59 e   | 0.61 f  | 0.62 f   | 0.64 g   | 0.66 g   | 0.67 g   |
| 500                       | 40     | 0.85 e   | 0.90 cd  | 0.99 c   | 1.05 d   | 1.13 c   | 1.19 d  | 1.30 d   | 1.35 d   | 1.39 d   | 1.42 d   |
|                           | 60     | 0.71 c   | 0.73 e   | 0.80 d   | 0.85 e   | 0.92 d   | 0.98 e  | 1.05 e   | 1.10 e   | 1.14 e   | 1.19 e   |
| 1000                      | 40     | 0.94 d   | 0.99 b   | 1.13 b   | 1.21 c   | 1.30 c   | 1.00 c  | 1.64 c   | 1.69 c   | 1.72 c   | 1.76 c   |
|                           | 60     | 0.82 b   | 0.89 d   | 0.97 c   | 1.03 d   | 1.14 c   | 1.21 d  | 1.35 d   | 1.40 d   | 1.45 d   | 1.49 d   |
| Bushgan بوشگان            |        |          |          |          |          |          |         |          |          |          |          |
| 0                         | 40     | 2.13 b   | 2.15 c   | 2.18 c   | 2.21 c   | 2.24 bcd | 2.29 c  | 2.31 c   | 2.33 c   | 2.35 b   | 2.37 c   |
|                           | 60     | 0.78 e   | 0.82 f   | 0.84 g   | 0.86 f   | 0.87 e   | 0.90 d  | 0.92 d   | 0.91 d   | 0.97 c   | 1.00 d   |
| 500                       | 40     | 2.05 b   | 2.37 bc  | 2.62 b   | 2.73 b   | 2.83 ab  | 2.94 b  | 3.04 b   | 3.10 b   | 3.10 ab  | 3.11 b   |
|                           | 60     | 1.05 de  | 1.22 e   | 1.36 f   | 1.45 e   | 1.77 d   | 2.08 c  | 2.27 c   | 2.30 c   | 2.32 b   | 2.33 c   |
| 1000                      | 40     | 2.41 ab  | 2.63 ab  | 2.73 b   | 2.82 b   | 2.85 ab  | 3.12 b  | 3.32 b   | 3.33 b   | 3.50 ab  | 3.36 b   |
|                           | 60     | 1.24 cd  | 1.41 de  | 1.70 e   | 1.86 d   | 2.12 cd  | 2.27 c  | 2.38 c   | 2.40 c   | 2.42 b   | 2.44 c   |
| Lenjan لنجان              |        |          |          |          |          |          |         |          |          |          |          |
| 0                         | 40     | 6.20 b   | 6.24 c   | 6.30 cd  | 6.34 cd  | 6.44 bc  | 6.50 bc | 6.56 bc  | 6.59 c   | 6.71 bc  | 6.87 bc  |
|                           | 60     | 4.50 e   | 4.64 e   | 4.75 f   | 5.04 f   | 4.97 e   | 5.25 d  | 5.30 d   | 5.37 d   | 5.49 a   | 5.59 d   |
| 500                       | 40     | 6.50 b   | 6.47 bc  | 6.52 bc  | 6.63 bc  | 6.70 b   | 6.81 b  | 6.84 b   | 6.93 bc  | 7.00 bc  | 7.13 b   |
|                           | 60     | 5.30 d   | 5.71 d   | 5.86 e   | 5.91 e   | 5.98 d   | 6.14 c  | 6.33 c   | 6.44 c   | 6.51 c   | 6.60 c   |
| 1000                      | 40     | 6.52 b   | 6.67 b   | 6.72 b   | 6.79 b   | 6.81 b   | 6.90 b  | 6.96 b   | 7.10 b   | 7.16 b   | 7.23 b   |
|                           | 60     | 5.67 c   | 5.71 d   | 5.77 e   | 5.96 e   | 6.33 d   | 6.46 c  | 6.57 bc  | 6.74 bc  | 6.82 bc  | 6.85 bc  |
| Ebrahim Abad ابراهیم آباد |        |          |          |          |          |          |         |          |          |          |          |
| 0                         | 40     | 12.10 b  | 12.11 b  | 12.13 b  | 12.17 b  | 12.08 b  | 12.22 b | 12.27 b  | 12.35 b  | 12.38 b  | 12.45 b  |
|                           | 60     | 8.00 e   | 8.10 e   | 8.08 e   | 8.12 e   | 8.15 e   | 8.18 e  | 8.22 e   | 8.26 e   | 8.31 e   | 8.35 e   |
| 500                       | 40     | 12.17 ab | 12.20 ab | 12.23 b  | 12.27 b  | 12.30 ab | 12.13 b | 12.40 ab | 12.40 ab | 12.50 ab | 12.55 ab |
|                           | 60     | 8.16 de  | 8.18 de  | 8.22 de  | 8.25 de  | 8.28 de  | 8.32 de | 8.38 de  | 8.42 de  | 8.46 de  | 8.25 de  |
| 1000                      | 40     | 12.32 a  | 12.36 a  | 12.39 a  | 12.43 a  | 12.45 a  | 12.49 a | 12.52 a  | 12.55 a  | 12.60 a  | 12.65 a  |
|                           | 60     | 8.30 d   | 8.32 d   | 8.35 d   | 8.40 d   | 8.42 d   | 8.87 d  | 8.52 d   | 8.52 d   | 8.60 d   | 8.67 d   |
| Jadushi جدوشی             |        |          |          |          |          |          |         |          |          |          |          |
| 0                         | 40     | 18.43 a  | 18.47 a  | 18.56 a  | 18.62 a  | 18.65 a  | 18.66 a | 18.67 a  | 18.69 a  | 18.69 a  | 18.71 a  |
|                           | 60     | 13.55 b  | 13.64 b  | 13.72 b  | 13.80 b  | 13.84 b  | 13.86 b | 13.89 b  | 13.92 b  | 13.94 b  | 13.97 b  |
| 500                       | 40     | 18.66 a  | 18.68 a  | 18.70 a  | 18.75 a  | 18.80 a  | 18.81 a | 18.83 a  | 18.87 a  | 18.92 a  | 19.00 a  |
|                           | 60     | 13.62 b  | 15.11 b  | 13.84 b  | 13.92 b  | 13.97 b  | 13.98 b | 13.99 b  | 14.01 b  | 14.03 b  | 14.10 b  |
| 1000                      | 40     | 18.61 a  | 18.71 a  | 18.66 a  | 18.70 a  | 18.71 a  | 18.72 a | 18.74 a  | 18.75 a  | 18.75 a  | 18.80 a  |
|                           | 60     | 13.65 b  | 14.30 b  | 13.70 b  | 13.90 b  | 13.86 b  | 13.87 b | 13.89 b  | 14.00 b  | 13.91 b  | 13.93 b  |

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر فسفر و سولفات قابل جذب خاک

نتایج نشان داد که با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در هر دو محتوای رطوبتی ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، غلظت فسفر قابل جذب خاک افزایش یافت ( $p < 0.05$ ) (جدول ۶). 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 تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و رطوبت ۴۰ درصد در خاک‌های غیر شور و با شوری کمتر مشاهده شد و خاک‌های با شوری زیاد (ابراهیم‌آباد و جدوشی) کمترین واکنش را به گوگرد نشان دادند (جدول ۵).

Ghaderi و همکاران (۲۰۱۹) و Kaplan و Orman (۱۹۹۸) نیز گزارش کردند که افزایش مقدار فسفر قابل جذب با کاربرد گوگرد، به کاهش pH خاک و آزادسازی فسفر از ترکیبات نامحلول نسبت داده می‌شود. در خاک بوشگان که شوری کمتری نسبت به لنجان داشت، غلظت فسفر کمتر بود، این ممکن است بخاطر درصد بالای آهک در خاک بوشگان (۵۰ درصد) باشد. در خاک های آهکی، غلظت بالای یون کلسیم در محلول خاک با تبدیل یون‌های فسفات به صورت فسفات‌های مختلف کلسیم منجر به کاهش غلظت فسفر قابل جذب خاک می‌گردد که احتمالاً یکی از دلایل کاهش فسفر قابل جذب ناشی از همین عامل است (Babaei et al., 2012). غلظت فسفر قابل جذب در خاک‌های

غیرشور (دره بید، کم سرخ و بوشگان) در طول 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.

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر فسفر و سولفات محلول خاک

Table 6. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil soluble phosphorus and sulfate.

| سری خاک<br>Soil Series       | S<br>(kg/ha) | SP<br>(%) | Phosphorus (mg/kg) |          |          |          | Sulfate (mg/kg) |         |          |
|------------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|-----------------|---------|----------|
|                              |              |           | 40 days            | 80 days  | 120 days | 360 days | 25 days         | 60 days | 360 days |
|                              |              |           |                    |          |          |          |                 |         |          |
| دره بید<br>Dareh Bid         | 0            | 40        | 20.4 f             | 20.6 g   | 20.8 de  | 20.47 e  | 33 F            | 45 F    | 69 F     |
|                              |              | 60        | 20.3 g             | 20.5 h   | 20.6 e   | 20.60 e  | 26 F            | 37 F    | 54 F     |
|                              | 500          | 40        | 20.8 c             | 21.23 d  | 21.6 c   | 22.3 c   | 856 e           | 1056 e  | 1162 e   |
|                              |              | 60        | 20.4 fg            | 20.7 f   | 20.9 d   | 21.4 d   | 732 e           | 858 e   | 972 e    |
|                              | 100          | 40        | 22.0 a             | 22.8 a   | 23.50 a  | 24.5 a   | 2202 c          | 2823 c  | 3575 c   |
|                              |              | 60        | 20.6 e             | 21.5 c   | 22.20 b  | 23.1 b   | 1436 d          | 1746 d  | 2083 d   |
| کم سرخ<br>Kam Sorkh          | 0            | 40        | 12.7 c             | 12.8 cd  | 12.9 d   | 12.60 c  | 667 f           | 730 g   | 767 g    |
|                              |              | 60        | 12.2 e             | 12.4 e   | 12.4 g   | 12.3 d   | 655 g           | 666 h   | 678 h    |
|                              | 500          | 40        | 12.8 bc            | 12.9 c   | 13.1 c   | 12.8 b   | 1162 d          | 1455 d  | 1565 d   |
|                              |              | 60        | 12.2 e             | 12.3 e   | 12.6 f   | 12.5 c   | 1068 e          | 1246 f  | 1352 f   |
|                              | 100          | 40        | 13.1 a             | 13.4 a   | 13.7 a   | 13.4 a   | 1303 c          | 1593 c  | 1739 c   |
|                              |              | 60        | 12.7 c             | 12.91 c  | 13.1 c   | 12.8 b   | 1068 e          | 1306 e  | 1490 e   |
| بوشگان<br>Bushgan            | 0            | 40        | 3.2 c              | 3.5 e    | 3.4 d    | 3.3 cd   | 3890 g          | 3977 g  | 3604 h   |
|                              |              | 60        | 3.8 d              | 3.1 f    | 3.0 e    | 2.9 e    | 3776 h          | 3844 h  | 3796 c   |
|                              | 500          | 40        | 3.5 b              | 3.8 cd   | 3.7 bc   | 3.6 bc   | 4231 e          | 4350 e  | 4239 e   |
|                              |              | 60        | 3.2 c              | 3.5 e    | 3.3 d    | 3.2 de   | 4040 f          | 4231 f  | 4060 f   |
|                              | 100          | 40        | 3.9 a              | 4.6 a    | 4.5 a    | 3.4 a    | 4468 c          | 4760 c  | 4625 c   |
|                              |              | 60        | 3.6 b              | 3.9 bc   | 3.9 b    | 3.7 b    | 4371 d          | 4516 d  | 4450 d   |
| لنجان<br>Lenjan              | 0            | 40        | 13.2 c             | 13.1 cd  | 13.0 ab  | 13.0 ab  | 3718 f          | 3549 e  | 3518 e   |
|                              |              | 60        | 12.87 d            | 12.83 de | 12.7 bc  | 12.6 bc  | 3537 g          | 3500 e  | 3070 f   |
|                              | 500          | 40        | 13.20 c            | 13.1 cd  | 13.0 ab  | 13.0 ab  | 6145 a          | 5920 b  | 5460 c   |
|                              |              | 60        | 12.83 d            | 12.7 e   | 12.5 c   | 12.5 c   | 5337 e          | 5312 d  | 5224 d   |
|                              | 100          | 40        | 13.70 a            | 13.57 a  | 13.4 a   | 13.2 a   | 5826 c          | 5660 c  | 5557 c   |
|                              |              | 60        | 13.40 bc           | 13.20 bc | 13.1 ab  | 12.9 abc | 5557 d          | 5293 d  | 5278 d   |
| ابراهیم آباد<br>Ebrahim Abad | 0            | 40        | 4.57 a             | 4.47 a   | 4.30 a   | 4.23 a   | 5607 e          | 5500 e  | 5420 g   |
|                              |              | 60        | 4.03 a             | 3.92 b   | 3.87 a   | 3.77 a   | 5423 f          | 5401 f  | 5380 h   |
|                              | 500          | 40        | 4.60 a             | 4.43 ab  | 4.33 a   | 4.20 a   | 5841 b          | 5706 c  | 5620 c   |
|                              |              | 60        | 4.00 a             | 3.93 ab  | 3.83 a   | 3.70 a   | 5756 c          | 5705 c  | 5618 d   |
|                              | 100          | 40        | 4.6 a              | 4.40 ab  | 4.23 a   | 4.10 a   | 5920 a          | 5806 b  | 5718 b   |
|                              |              | 60        | 4.4 a              | 4.30 ab  | 4.10 a   | 4.03 a   | 5672 d          | 5620 d  | 5610 e   |
| جذوشی<br>Jadushi             | 0            | 40        | 2.3 c              | 2.3 c    | 2.3 b    | 2.2 b    | 5330 d          | 5250 d  | 5250 d   |
|                              |              | 60        | 2.2 d              | 2.2 d    | 2.2 c    | 2.1 c    | 5280 de         | 5220 d  | 5180 ef  |
|                              | 500          | 40        | 2.5 a              | 2.5 a    | 2.4 a    | 2.3 a    | 5572 b          | 5510 b  | 5430 b   |
|                              |              | 60        | 2.4 b              | 2.3 c    | 2.3 b    | 2.2 b    | 5239 e          | 5220 b  | 5130 f   |
|                              | 100          | 40        | 2.4 b              | 2.4 b    | 2.3 b    | 2.2 b    | 5686 a          | 5640 a  | 5610 a   |
|                              |              | 60        | 2.3 c              | 2.2 d    | 2.2 c    | 2.2 b    | 5385 c          | 5273 cd | 5210 de  |

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

افزایش می‌دهد. اثرات مفید کاربرد گوگرد در افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی کم‌مصرف از جمله آهن و روی توسط Abdou و همکاران (۲۰۱۱) و Besharati و همکاران، (۲۰۱۷) نیز تأیید شده است.

همانند نتایج فسفر قابل جذب، مقدار سولفات محلول خاک با کاربرد گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۶). این افزایش را می‌توان عمدتاً به مکانیسم اکسایش زیستی گوگرد عنصری نسبت داد. در این فرایند، باکتری‌های اکسید کننده گوگرد (مانند تیوباسیلوس) با استفاده از گوگرد به‌عنوان منبع انرژی، آن را طی یک سری واکنش‌های آنزیمی به سولفات تبدیل می‌کنند (Chaudhary et al., 2023).

بیش‌ترین مقدار سولفات محلول در تیمار ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار و تحت شرایط رطوبتی ۴۰ درصد اشباع مشاهده شد. به نظر می‌رسد این شرایط رطوبتی (۴۰ درصد) نقطه بهینه‌ای را فراهم می‌کند که در آن تبادل گازی (تهویه) و در نتیجه دسترسی به اکسیژن (که برای متابولیسم باکتری‌های هوازی اکسید کننده گوگرد ضروری است) در حداکثر خود قرار دارد (Zhao et al., 2022). از سوی دیگر، افزایش رطوبت به ۶۰ درصد 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 and Janzen, 1993). این الگو که در مطالعاتی با شرایط مشابه نیز گزارش شده است (قادری و همکاران, ۱۳۹۶; Orman and Kaplan, 2009). علاوه بر این، اسیدسولفوریک 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., 2014).

### تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر آهن و روی قابل جذب خاک

نتایج نشان داد با افزایش سطح مصرف گوگرد در شرایط ۴۰ و ۶۰ درصد رطوبت اشباع، آهن و روی قابل جذب خاک افزایش یافت ( $p < 0.05$ ). افزایش غلظت گوگرد به‌طور کلی باعث افزایش غلظت آهن و روی قابل جذب می‌شود، زیرا اکسایش گوگرد pH خاک را کاهش داده و حلالیت این عناصر را بهبود می‌بخشد. 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. خاک‌های با بافت سنگین‌تر و غیر شور مانند دره بید دارای بیشترین غلظت آهن و روی بودند (جدول ۷) که یکی از دلایل آن اکسایش بیشتر گوگرد در این خاک به دلیل شوری پایین و دلیل دیگر pH اولیه پایین‌تر نسبت به بقیه خاک‌هاست. در حالی که در خاک‌های بسیار شور (مانند ابراهیم‌آباد و جدوشی) غلظت آهن و روی کاهش یافت. Kalbasi و همکاران (۱۹۸۸) و Safaa و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که اکسایش گوگرد در اثر کاربرد آن در خاک با تولید اسیدسولفوریک، pH و غلظت بی‌کربنات را کاهش و مقدار آهن و روی قابل جذب را

جدول ۷- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی بر آهن و روی قابل جذب خاک

Table 7. Comparison of the mean effect of different sulfur levels under various moisture conditions on soil available Fe and Zn.

| سری خاک<br>Soil Series       | S<br>(kg/ha) | SP (%) | Fe (mg/kg) |          |          |          | Zn (mg/kg) |          |          |          |
|------------------------------|--------------|--------|------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|
|                              |              |        | 40 days    | 80 days  | 120 days | 360 days | 40 days    | 80 days  | 120 days | 360 days |
| دره بید<br>Dareh Bid         | 0            | 40     | 3.03 d     | 3.06 de  | 3.08 e   | 3.06 de  | 0.51 abcd  | 0.53 cd  | 0.57 bc  | 0.53 bcd |
|                              |              | 60     | 2.96 e     | 3.02 e   | 3.05 e   | 3.01 e   | 0.46 d     | 0.49 d   | 0.54 c   | 0.56 bcd |
|                              | 500          | 40     | 3.14 b     | 3.18 bc  | 3.24 c   | 3.18 b   | 0.54 ab    | 0.62 a   | 0.68 a   | 0.59 ab  |
|                              |              | 60     | 3.08 cd    | 3.10 d   | 3.15 d   | 3.12 cd  | 0.48 bcd   | 0.52 cd  | 0.55 c   | 0.51 d   |
|                              | 1000         | 40     | 3.09 bc    | 3.17 c   | 3.28 bc  | 3.18 b   | 0.53 abc   | 0.60 ab  | 0.67 a   | 0.58 abc |
|                              |              | 60     | 3.05 cd    | 3.01 d   | 3.28 d   | 3.13 bc  | 0.47 cd    | 0.52 cd  | 0.56 bc  | 0.52 cd  |
| کم سرخ<br>Kam Sorkh          | 0            | 40     | 3.03 d     | 3.06 de  | 3.08 e   | 3.06 de  | 0.51 abcd  | 0.53 cd  | 0.57 bc  | 0.53 bcd |
|                              |              | 60     | 2.96 e     | 3.02 e   | 3.05 e   | 3.01 e   | 0.46 d     | 0.49 d   | 0.54 c   | 0.56 bcd |
|                              | 500          | 40     | 3.14 b     | 3.18 bc  | 3.24 c   | 3.18 b   | 0.54 ab    | 0.62 a   | 0.68 a   | 0.59 ab  |
|                              |              | 60     | 3.08 cd    | 3.10 d   | 3.15 d   | 3.12 cd  | 0.48 bcd   | 0.52 cd  | 0.55 c   | 0.51 d   |
|                              | 1000         | 40     | 3.09 bc    | 3.17 c   | 3.28 bc  | 3.18 b   | 0.53 abc   | 0.60 ab  | 0.67 a   | 0.58 abc |
|                              |              | 60     | 3.05 cd    | 3.01 d   | 3.28 d   | 3.13 bc  | 0.47 cd    | 0.52 cd  | 0.56 bc  | 0.52 cd  |
| بوشگان<br>Bushgan            | 0            | 40     | 7.00 d     | 7.31 c   | 7.22 d   | 7.15 b   | 0.61 cd    | 0.59 cde | 0.57 cde | 0.56 cd  |
|                              |              | 60     | 6.30 e     | 6.51 d   | 6.31 e   | 6.21 c   | 0.55 e     | 0.55 e   | 0.53 e   | 0.53 d   |
|                              | 500          | 40     | 7.31 bc    | 7.69 b   | 7.57 bc  | 7.33 b   | 0.64 cd    | 0.62 cd  | 0.61 cd  | 0.60 c   |
|                              |              | 60     | 6.59 e     | 6.67 d   | 6.55 e   | 6.30 c   | 0.59 de    | 0.57 de  | 0.55 de  | 0.54 cd  |
|                              | 1000         | 40     | 7.49 b     | 7.89 b   | 7.74 b   | 7.57 ab  | 0.72 b     | 0.71 b   | 0.70 b   | 0.68 b   |
|                              |              | 60     | 7.08 cd    | 7.37 c   | 7.33 cd  | 7.30 b   | 0.65 c     | 0.63 c   | 0.61 c   | 0.59 c   |
| لنجان<br>Lenjan              | 0            | 40     | 6.28 a     | 6.25 a   | 6.19 a   | 5.83 d   | 0.61 a     | 0.59 a   | 0.51 ab  | 0.42 ab  |
|                              |              | 60     | 5.99 b     | 5.89 c   | 5.82 c   | 5.64 e   | 0.57 a     | 0.51 ab  | 0.43 ab  | 0.36 b   |
|                              | 500          | 40     | 6.27 a     | 6.23 a   | 6.18 a   | 6.15 a   | 0.59 a     | 0.57 ab  | 0.52 ab  | 0.43 a   |
|                              |              | 60     | 6.18 ab    | 6.17 ab  | 6.15 ab  | 6.11 ab  | 0.57 a     | 0.55 ab  | 0.45 ab  | 0.37 b   |
|                              | 1000         | 40     | 6.25 a     | 6.22 a   | 6.19 a   | 6.07 b   | 0.58 a     | 0.58 a   | 0.55 a   | 0.47 a   |
|                              |              | 60     | 6.12 b     | 6.10 b   | 6.02 b   | 5.90 c   | 0.57 a     | 0.51 b   | 0.50 ab  | 0.37 b   |
| ابراهیم آباد<br>Ebrahim Abad | 0            | 40     | 4.97 a     | 4.89 a   | 4.83 a   | 4.71 a   | 0.56 a     | 0.54 a   | 0.52 a   | 0.51 b   |
|                              |              | 60     | 4.00 d     | 3.93 c   | 3.87 c   | 3.75 c   | 0.50 ab    | 0.47 b   | 0.45 a   | 0.43 a   |
|                              | 500          | 40     | 4.72 ab    | 4.63 ab  | 4.56 ab  | 4.51 ab  | 0.55 a     | 0.54 a   | 0.51 a   | 0.48 bc  |
|                              |              | 60     | 4.50 bc    | 4.43 abc | 4.38 abc | 4.29 abc | 0.51 ab    | 0.49 ab  | 0.47 a   | 0.45 bc  |
|                              | 1000         | 40     | 4.59 abc   | 4.47 abc | 4.31 abc | 4.27 abc | 0.54 a     | 0.53 a   | 0.50 a   | 0.46 bc  |
|                              |              | 60     | 4.24 cd    | 4.03 c   | 3.97 bc  | 3.84 c   | 0.51 ab    | 0.49 ab  | 0.46 a   | 0.44 c   |
| جذوشی<br>Jadushi             | 0            | 40     | 1.01 a     | 1.00 a   | 0.98 a   | 0.90 a   | 0.70 a     | 0.65 a   | 0.61 a   | 0.58 a   |
|                              |              | 60     | 0.90 bc    | 0.88 bc  | 0.84 cd  | 0.80 bc  | 0.75 a     | 0.66 a   | 0.60 a   | 0.57 a   |
|                              | 500          | 40     | 0.98 ab    | 0.95 ab  | 0.94 ab  | 0.84 ab  | 0.74 a     | 0.66 a   | 0.62 a   | 0.60 a   |
|                              |              | 60     | 0.79 de    | 0.77 de  | 0.76 de  | 0.71 cd  | 0.77 a     | 0.65 a   | 0.60 a   | 0.58 a   |
|                              | 1000         | 40     | 0.93 bc    | 0.92 bc  | 0.89 bc  | 0.80 b   | 0.70 a     | 0.61 a   | 0.56 a   | 0.55 a   |
|                              |              | 60     | 0.79 de    | 0.75 de  | 0.74 e   | 0.71 cd  | 0.77 a     | 0.60 a   | 0.55 a   | 0.54 a   |

\* حروف مشابه در هر ستون و برای هر سری خاک به طور مجزا، نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

\*Similar letters within each column and for each soil series separately indicate no significant difference at the 5% level.

## نتیجه‌گیری

پارادوکس ظاهری (اکسایش کمتر در دوز بالاتر) را می‌توان به مکانیسم‌های بازدارنده در سطوح بالای گوگرد مانند کاهش pH، افزایش استرس اسمزی ناشی از تجمع املاح و احتمال تشکیل لایه‌ای از مواد حد واسط محدودکننده برای دسترسی میکروبی به ذرات گوگرد نسبت داد. یافته‌ها بر اهمیت مدیریت توأم رطوبت (در حد ظرفیت مزرعه ۴۰~ درصد اشباع) و شوری خاک برای دستیابی به حداکثر کارایی گوگرد تأکید می‌کند. بر این اساس، توصیه می‌شود مطالعات آینده به بررسی دینامیک جمعیت میکروبی و بیان ژن‌های درگیر در اکسایش گوگرد (مانند Sox genes) در پاسخ به تنش شوری و سطوح مختلف گوگرد بپردازند. این کار می‌تواند درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های مولکولی (بازدارندگی) در شرایط شور و راه‌های غلبه بر آن را فراهم کند.

این مطالعه به وضوح نشان داد که واکنش خاک به کاربرد گوگرد به شدت تحت تأثیر شوری ذاتی خاک، سطح رطوبت و مقدار گوگرد مصرفی قرار دارد. به طور کلی، خاک‌های غیر شور و کم‌شور (با شوری کمتر از ۸ dS/m) به دلیل عدم وجود استرس اسمزی و سمیت یونی، پاسخ بسیار بهتری به اصلاح گوگردی نشان دادند. از نظر مکانیسمی، بهترین نتایج در بهبود ویژگی‌های شیمیایی (کاهش pH و افزایش قابل توجه غلظت عناصر غذایی) در تیمار با بالاترین دوز گوگرد (۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد، چرا که این مقدار گوگرد، اسیدسولفوریک کافی برای غلبه بر ظرفیت بافری خاک‌های مورد مطالعه و انحلال ترکیبات معدنی تولید کرد. در مقابل، بیشترین نرخ اکسایش گوگرد در تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار و تحت رطوبت ۴۰ درصد اشباع ثبت شد. این

## 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). Agronomy Monograph No. 9, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Babaei, P., Golchin, A., Besharati, H., & Afzali, M. (2012). Effect of microbial sulfur fertilizer on nutrient uptake and yield of soybean in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 26(2), 145-151. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2012.126366> (In Persian)
- Bawer, 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. (2017). 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), 103-112. <https://doi.org/10.29252/asr.4.1.103> (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 Inc. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- 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. *Soil Science Society of America Proceedings*, 15, 149-151.
- de Souza Freitas, W. E., de Oliveira, A. B., Mesquita, R. O., de Carvalho, H. H., Prisco, J. T., & Gomes-Filho, E. (2019). Sulfur-induced salinity tolerance in lettuce is due to a better P and K uptake, lower Na/K ratio and an efficient antioxidative defense system. *Scientia Horticulturae*, 257, 108764. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108764>
- Degryse, F., Baird, R., Andelkovic, I., & McLaughlin, M. J. (2021). Long-term fate of fertilizer sulfate-and elemental S in co-granulated fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,

- 120, 31–48. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10111-1>
13. 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.
14. Germida, J. J., & Janzen, H. H. (1993). Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer Research*, 35, 101–114. <https://doi.org/10.1007/BF00748735>
15. 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)
16. Hammerschmidt, T., Holatko, J., Bytesnikova, Z., Skarpa, P., Richtera, L., Kintl, A., Pekarkova, J., Kucerik, J., Jaskulska, I., Radziemska, M. and Valova, R. (2024). The impact of single and combined amendment of elemental sulphur and graphene oxide on soil microbiome and nutrient transformation activities. *Heliyon*, 10(19). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38439>
17. 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>
18. Islam, S. N. U., Arshad, M., Ahmad, S., & Asgher, M. (2024). Role of sulfur and its crosstalk with phytohormones under abiotic stress in plants. In M. A. Ahanger, J. A. Bhat, P. Ahmad, & R. John (Eds.), *Improving Stress Resilience in Plants* (pp. 225–247). Academic Press, Elsevier Inc., USA. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18927-2.00010-8>
19. Janzen, H. H., & Bettany, J. R. (1987). Oxidation of elemental sulfur under field conditions in central Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 67, 609–618. <https://doi.org/10.4141/cjss87-057>
20. 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, 1353–1360. <https://doi.org/10.1080/01904168809363892>
21. Kaplan, M., & Orman, S. (1998). Effect of elemental sulfur and sulfur containing waste in a calcareous soil in Turkey. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 1655–1665. <https://doi.org/10.1080/01904169809365511>
22. Kasraian, A., Karimian, N., & Pazira, E. (2012). Effect of sulfur application on spinach phytoremediation process of cadmium in contaminated calcareous soils. *Journal of Water and Wastewater*, 27(2), 52–58. (Text in Persian)
23. Knudsen, D., Peterson, G.A., and Pratt P.F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. Pp. 225–246. In Page A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis*. Part2. Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America. Book Ser. 5. Madison, WI, USA.
24. Lee, A., Boswell, C. C., & Watkinson, J. H. (1988). Effect of particle size on the oxidation of elemental sulphur, thiobacilli numbers, soil sulphate, and its availability to pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 31(2), 179–186.
25. Li, Q., Gao, Y., & Yang, A. (2020). Sulfur homeostasis in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 8926. <https://doi.org/10.3390/ijms21238926>
26. 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, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
27. Modaihsh, A. S., Al-Mustafa, W. A., & Metwally, A. I. (1989). Effect of elemental sulfur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. *Journal of Plant and Soil*, 16, 95–101.
28. 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.
29. 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. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2701>
30. Orman, S., & 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. <http://www.asianjournalofchemistry.com/>
31. 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. [http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/am0912/004\\_20999am0912\\_19\\_24](http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/am0912/004_20999am0912_19_24)
32. 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. (In Persian)

33. Slaton, N. A. (1998). *The influence of elemental sulfur amendments on soil chemical properties and rice growth* (Doctoral dissertation, University of Arkansas, Arkansas, USA).
34. Soil and Water Research Institute, S. (2014). Fundamental and principal report of the Soil and Water Research Institute strategic program in 2014. Soil and Water Research Institute, Tehran. (in Persian).
35. Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (1958). *Soil fertility and fertilizers* (2nd ed.). McMillan Publishing Company, New York, USA.
36. Turan, M. A., Taban, S., Katkat, A. V., & Kucukyumuk, Z. (2013). The evaluation of the elemental sulfur and gypsum effect on soil pH, EC, SO<sub>4</sub>-S and available Mn content. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(1), 572–575.
37. Yadav, B., Jogawat, A., Lal, S. K., Lakra, N., Mehta, S., Shabek, N., & Narayan, O. P. (2021). Plant mineral transport systems and the potential for crop improvement. *Planta*, 253, 45. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03533-3>
38. 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>