

(OPEN ACCESS)

Evaluation of sulfur and *Thiobacillus* application effects on chemical properties of calcareous soils under greenhouse conditions

Yaser Azimzadeh^{*1}, Arash Mohammadzadeh², Mehdi Kooselou³, Alireza Javidan⁴

1. Corresponding Author, Assistant Prof. of Natural Resources Management Research Department, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran. E-mail: y.azimzadeh@areeo.ac.ir
2. Assistant Prof. of Natural Resources Management Research Department, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran. E-mail: a.mohammadzadeh@areeo.ac.ir
3. Natural Resources Management Research Department, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran. E-mail: m.kooselou633@gmail.com
4. Ministry of Agriculture-Jahad, Maragheh, Iran. E-mail: javidanali876@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Calcareous soils face numerous limitations, including high pH and reduced nutrient solubility, leading to decreased plant availability of essential nutrients and reduced agricultural productivity. An effective strategy to improve these soil properties is the use of sulfur as an acidifying amendment. This study aimed to investigate the effects of different sulfur levels on enhancing soil chemical properties and promoting plant growth in soils with varying calcium carbonate contents.
Article history: Received: 06.16.2025 Revised: 10.20.2025 Accepted: 10.20.2025	
Keywords: Calcareous soil, Organic matter, Sulfur	
	Materials and Methods: A factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications under greenhouse conditions. Experimental treatments included four calcareous soil types (containing 39%, 34%, 14%, and 8% calcium carbonate) and four elemental sulfur levels (0, 300, 600, and 900 mg kg ⁻¹ soil) inoculated with <i>Thiobacillus</i> bacteria (equivalent to 2% of applied sulfur weight). Sixty days after sowing 10 wheat plants (<i>Sardari</i> cultivar) in pots containing 3 kg of soil, plant growth parameters and soil chemical properties were measured in each pot.
	Results: The findings revealed that soil type had a significant effect ($P \leq 0.01$) on all studied soil properties and plant growth indices. The application of elemental sulfur significantly affected ($P \leq 0.01$) calcium carbonate content, pH, EC, and available phosphorus in the soil, as well as plant height, shoot dry weight, and root-to-shoot ratio. However, its effect on available potassium was significant ($P \leq 0.05$). Increasing sulfur levels reduced calcium carbonate content in all four soil types, though the magnitude of reduction varied among soils. Sulfur application also decreased pH and increased EC in all soils, although the pH reduction in soils 1 and 2 was not statistically significant. Available potassium showed an increasing trend in all soils, but this increase was not significant in soils

1 and 2. Regarding plant growth parameters, both shoot dry weight and plant height increased up to 600 mg kg⁻¹ sulfur application, then decreased at 900 mg kg⁻¹. Regression analysis determined the optimal sulfur application rate for maximum yield in calcareous soils to be between 230 and 475 mg kg⁻¹ of soil (equivalent to 600-1235 kg ha⁻¹).

Conclusion: The response of both soil and plants to sulfur application depends on soil type and the amount of sulfur applied, with optimal sulfur application potentially improving plant growth in calcareous soils. However, higher calcium carbonate content in soil does not necessarily require greater sulfur application. Rather, for all calcareous soils (with varying calcium carbonate percentages), applying sulfur within a specific optimal range can effectively enhance soil properties and plant performance.

Cite this article: Azimzadeh, Yaser, Mohammadzadeh, Arash, Kooselou, Mehdi, Javidan, Alireza. 2026. Evaluation of sulfur and *Thiobacillus* application effects on chemical properties of calcareous soils under greenhouse conditions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 16 (2), 119-135.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23631.2196

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



ارزیابی تأثیر کاربرد گوگرد و باکتری تیوباسیلوس بر خصوصیات شیمیایی خاک‌های آهکی در شرایط گلخانه

یاسر عظیم‌زاده^{۱*}، آرش محمدزاده^۲، مهدی کوسه‌لو^۳، علیرضا جاویدان^۴

۱. نویسنده مسئول، استادیار بخش تحقیقات مدیریت منابع، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران. رایانامه: y.azimzadeh@areeo.ac.ir
۲. استادیار بخش تحقیقات مدیریت منابع، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران. رایانامه: a.mohammadzadeh@areeo.ac.ir
۳. بخش تحقیقات مدیریت منابع، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران. رایانامه: m.kooselou633@gmail.com
۴. سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی، مراغه، ایران. رایانامه: javidanali876@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸ واژه‌های کلیدی: خاک آهکی، گوگرد معدنی، ماده آلی	سابقه و هدف: خاک‌های آهکی با محدودیت‌های متعددی از جمله pH بالا و کاهش حاصلخیزی عناصر غذایی مواجه هستند. این شرایط منجر به کاهش دسترسی گیاهان به عناصر غذایی ضروری و افت عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود. یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود ویژگی‌های این خاک‌ها، استفاده از گوگرد به‌عنوان یک اصلاح‌کننده اسیدی است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف گوگرد عنصری بر بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش رشد گیاه در خاک‌های با درصد کربنات کلسیم متفاوت انجام شد. مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار خاک آهکی (حاوی ۳۹، ۳۴، ۱۴ و ۸ درصد کربنات کلسیم معادل) و چهار سطح گوگرد عنصری (۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) همراه با باکتری تیوباسیلوس (معادل ۲ درصد وزن گوگرد مصرفی) بودند. شصت روز پس از کاشت ۱۰ بوته گندم رقم صدار در گلدان‌های حاوی ۳ کیلوگرم خاک، شاخص‌های رشد گیاه و ویژگی‌های شیمیایی خاک در هر یک از گلدان‌ها تعیین شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد که اثر نوع خاک بر همه ویژگی‌های مورد مطالعه خاک و شاخص‌های رشد گیاه در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود. هم‌چنین اثر سطوح مختلف گوگرد عنصری بر درصد کربنات کلسیم، pH، EC و فسفر قابل‌جذب خاک و هم‌چنین بر

ارتفاع بوته، وزن خشک شاخساره و نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره در سطح احتمال یک درصد ولی بر پتاسیم قابل جذب خاک در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) معنی دار بود. با افزایش سطح گوگرد، مقدار کربنات کلسیم در هر چهار خاک مورد مطالعه کاهش یافت؛ هر چند مقدار این کاهش در خاک‌های مختلف متفاوت بود. همچنین، افزایش سطح گوگرد منجر به کاهش pH و افزایش EC در کلیه خاک‌ها شد؛ اگرچه کاهش pH در خاک‌های ۱ و ۲ از نظر آماری معنی دار نشد. پتاسیم قابل جذب نیز در تمام خاک‌ها روند افزایشی نشان داد، اما این افزایش در خاک‌های ۱ و ۲ معنی دار نشد. از نظر شاخص‌های رشد گیاه، وزن خشک شاخساره و ارتفاع بوته در تمام خاک‌ها تا سطح ۶۰۰ میلی گرم گوگرد افزایش و سپس در سطح ۹۰۰ میلی گرم کاهش یافت. بر اساس نتایج تحلیل رگرسیونی، مقادیر بهینه گوگرد عنصری برای دستیابی به حداکثر عملکرد در خاک‌های آهکی بین ۴۷۵-۲۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک (معادل ۱۲۳۵-۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) متغیر بود.

نتیجه‌گیری: پاسخ خاک و گیاه به کاربرد گوگرد به نوع خاک و مقدار گوگرد مصرفی بستگی دارد و کاربرد بهینه گوگرد می‌تواند موجب بهبود رشد گیاه در خاک‌های آهکی شود. با این حال، مقدار کربنات کلسیم زیاد خاک لزوماً به معنای نیاز به مصرف مقدار بیش‌تر گوگرد نیست، بلکه در تمامی خاک‌های آهکی (با درصد‌های مختلف آهک)، مصرف گوگرد در محدوده مشخص و بهینه می‌تواند منجر به بهبود ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاه شود.

استناد: عظیم‌زاده، یاسر، محمدزاده، آرش، کوسه‌لو، مهدی، جاویدان، علیرضا (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر کاربرد گوگرد و باکتری تیوباسیلوس بر خصوصیات شیمیایی خاک‌های آهکی در شرایط گلخانه. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۶ (۲)، ۱۱۹-۱۳۵.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23631.2196

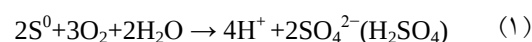


© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

نیاز جهانی به گندم به‌عنوان مهم‌ترین محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان، با شتاب فزاینده‌ای در حال افزایش است. این در حالی است که گستره اراضی قابل کشت این محصول در سطح جهان و به‌ویژه در ایران، با محدودیت جدی مواجه بوده و افزایش تولید از طریق بهبود بهره‌وری در واحد سطح تنها راهبرد عملی می‌باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد گندم در خاک‌های ایران، به‌ویژه در اراضی دیم، کم‌تر از میانگین جهانی است و بخش عمده‌ای از این کاهش، ناشی از محدودیت‌های ذاتی خاک‌های آهکی نظیر pH بالا، کمبود مواد آلی و محدودیت دسترسی به عناصر غذایی است (۱). در این میان، کاربرد گوگرد به‌عنوان یک راهکار با اثرات سه‌گانه (تأمین‌کننده عنصر غذایی، افزایش مقاومت گیاه به آفات، بیماری‌ها و تنش‌ها، اصلاح‌کننده خاک) مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. گوگرد علاوه‌بر این که به‌عنوان یک عنصر غذایی ضروری در سنتز پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و ویتامین‌های گیاهی نقش دارد، از طریق فرآیند اکسیداسیون میکروبی و تولید یون‌های H^+ موجب کاهش موضعی pH در ناحیه ریزوسفر و افزایش حلالیت عناصر غذایی کم‌تحرک نظیر فسفر، آهن و روی می‌شود. فرآیند اکسیداسیون گوگرد، تولید یون‌های H^+ و کاهش pH خاک آهکی را می‌توان به واکنش شیمیایی گوگرد با کربنات کلسیم ($CaCO_3$) نسبت داد. گوگرد بر اساس رابطه ۱ در خاک اکسید شده و به اسید سولفوریک (H_2SO_4) تبدیل می‌شود که طبق رابطه ۲ با کربنات کلسیم واکنش داده و منجر به تولید سولفات کلسیم ($CaSO_4$) و آزادسازی دی‌اکسیدکربن می‌شود:



این واکنش نه‌تنها باعث کاهش pH خاک می‌شود، بلکه حلالیت کربنات کلسیم را افزایش داده و در نتیجه محتوای آن را در خاک کاهش می‌دهد. علاوه‌بر آن، گوگرد و ترکیبات آن (مانند اسید سولفوریک و سولفیدها) خاصیت ضدعفونی‌کنندگی داشته و می‌توانند برخی از عوامل بیماری‌زای خاک‌زی (مانند نماتدها، قارچ‌های پاتوژن و باکتری‌های مضر) را سرکوب کنند. هم‌چنین، جذب گوگرد توسط گیاه باعث سنتز برخی از متابولیت‌های ثانویه (مانند گلوکوزینولات‌ها در گیاهان تیره کلم) می‌شود که مقاومت گیاه به آفات و تنش‌های محیطی را افزایش می‌دهد (۲). علاوه‌بر آن، گوگرد می‌تواند از طریق بهبود شرایط رشد و فعالیت ریزجانداران، به صورت غیرمستقیم فواید عناصر غذایی را در خاک بهبود دهد. به عنوان مثال، کریمی و موسوی (۲۰۲۳) گزارش کردند که افزودن ۱ و ۲ درصد گوگرد عنصری به یک خاک آهکی، فعالیت میکروبی خاک و کربن زیست توده میکروبی را افزایش داد (۳). با این حال، کارایی این فرآیند به فعالیت باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد به‌ویژه جنس تیوباسیلوس (*Thiobacillus*) وابسته است. بررسی‌ها حاکی از آن است که جمعیت طبیعی این باکتری‌ها در خاک‌های آهکی به دلیل شرایط قلیایی و کمبود مواد آلی، اغلب ناکافی بوده و تلقیح با سویه‌های کارآمدی از باکتری‌های تیوباسیلوس در این خاک‌ها ضروری می‌باشد. این رویکرد با تسریع فرآیند اکسیداسیون گوگرد، امکان دستیابی به اثرات اصلاحی در بازه زمانی کوتاه‌مدت را فراهم می‌سازد (۴).

پژوهش‌های متعددی تأثیر کاربرد گوگرد همراه با باکتری‌های اکسیدکننده را بر ویژگی‌های خاک‌های آهکی و عملکرد گیاهان بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، گزارش شده است که افزودن ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار همراه با باکتری تیوباسیلوس به یک خاک در شرایط گلخانه‌ای، باعث افزایش ۴۰

درصدی فراهمی گوگرد و کاهش pH خاک آهکی شد (۵). با این حال، اکسیداسیون گوگرد به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی از جمله دما، رطوبت و تراکم خاک قرار می گیرد. در این رابطه، ژاجی و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که در خاک های قلیایی، اکسیداسیون گوگرد در رطوبت ۶۰ درصد اشباع و دمای ۲۴ درجه سلسیوس، باعث افزایش ۳۵ درصدی فسفر قابل جذب خاک شد (۶). مطالعات مزرعه ای نیز تأثیر مثبت کاربرد گوگرد بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم را تأیید می کنند. به عنوان مثال، خاوازی و همکاران (۲۰۱۸) مشاهده کردند که کاربرد ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار همراه با تیوباسیلوس، عملکرد دانه و طول خوشه گندم را نسبت به شاهد به ترتیب به اندازه ۱۲۳ و ۳۱ درصد افزایش داد. باین حال، مصرف مقادیر بیش تر گوگرد (۲۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار) به دلیل ایجاد شوری و مسمومیت ناشی از سولفات زیاد، روند کاهشی در پارامترهای رشدی گیاه ایجاد کرد (۱). این پدیده در پژوهش بشارتی و ملک زاده (۲۰۱۵) نیز گزارش شد؛ به طوری که کاربرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار در خاک های آهکی، موجب کاهش جذب عناصر غذایی در سویا شد (۷). کریمی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که کاربرد هم زمان گوگرد، تیوباسیلوس و کود دامی، بیش ترین مقدار ماده خشک کلزا را تولید کرد که ناشی از هم افزایی بین مواد آلی و فرایندهای میکروبی در بهبود جذب عناصر غذایی بود (۸). این مطالعات به وضوح نشان می دهند که کاربرد مقادیر بهینه گوگرد و تیوباسیلوس می تواند عملکرد محصول را در خاک های آهکی بهبود بخشد. با توجه به این که pH بالا و محدودیت دسترسی به عناصر غذایی از عوامل محدود کننده ذاتی بسیاری از خاک های آهکی به شمار می روند، تا زمانی که این محدودیت ها تعدیل نشوند، حتی با مصرف مقادیر بیش تر کود نیز نمی توان

افزایش قابل توجه عملکرد محصول در این خاک ها را انتظار داشت. اگرچه کاربرد گوگرد و باکتری تیوباسیلوس به عنوان یک راهکار برای اصلاح این خاک ها شناخته شده است، اما یک پرسش کاربردی و کم تر بررسی شده این است که آیا خاک های با محتوای آهک بسیار متفاوت، به یک میزان و با یک روش، به کاربرد گوگرد پاسخ می دهند؟ بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی کمی رابطه بین مقدار آهک خاک و حد بهینه گوگرد و همچنین ارزیابی اثر متقابل این دو فاکتور بر ویژگی های شیمیایی خاک و رشد گندم اجرا شد. در این راستا، با به کارگیری روش تحلیل رگرسیونی، مدل هایی ارائه شد که می تواند مقدار گوگرد مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر عملکرد را در خاک های با مقادیر آهک متفاوت تعیین کنند. این رویکرد، گامی فراتر از مطالعات متعارف محسوب شده و راهبردی علمی برای ارائه توصیه های اختصاصی و مدیریت پایدار خاک های آهکی براساس آزمون خاک فراهم می آورد.

مواد و روش ها

به منظور بررسی تأثیر کاربرد گوگرد عنصری و باکتری تیوباسیلوس بر ویژگی های شیمیایی خاک های آهکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه در ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور در سال ۱۴۰۲ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار خاک آهکی (حاوی ۳۹، ۳۴، ۱۴ و ۸ درصد کربنات کلسیم معادل) و چهار سطح گوگرد عنصری (۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) همراه با باکتری تیوباسیلوس (معادل ۲ درصد وزن گوگرد مصرفی) بودند. چهار نمونه خاک مورد مطالعه طوری انتخاب شدند که از نظر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مشابه هم بوده ولی از نظر مقدار

سطح دریا برداشته شد. جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مهم خاک‌های مورد مطالعه قبل از اجرای آزمایش را نشان می‌دهد.

کربنات کلسیم معادل تفاوت قابل‌توجهی با هم داشتند. نمونه‌های خاک از یک مزرعه در روستای یللی درق شهرستان هشتروند با موقعیت جغرافیایی $37^{\circ}38'23''N$ و $46^{\circ}50'70''E$ و با ارتفاع ۱۸۷۲ متر از

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک‌های مورد مطالعه.

Table 1. Some initial physical and chemical properties of the studied soils.

Ava. K	Ava. P	TNV	OC	EC _e	pH	Texture	Soil
(mg kg ⁻¹)		(%)		(dS m ⁻¹)			
84	2.21	39	0.28	0.668	7.85	Silty loam	S1
374	2.35	34	0.36	0.921	7.81	Silty clay loam	S2
150	2.55	14	0.31	0.384	7.72	Sandy loam	S3
303	2.65	8	0.45	1.068	7.65	Sandy loam	S4

pH و EC_e: به ترتیب، اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع؛ OC: درصد کربن آلی؛ TNV: ارزش خثی‌سازی کل (آهک)؛ Ava. K و Ava. P: به ترتیب، پتاسیم و فسفر قابل جذب

صدرا در هر گلدان کشت و بعد از ۱۰ روز به ۱۰ بوته تنک شد. پس از دوره انکوباسیون ۱۵ روزه، در طول دوره رشد گیاه، رطوبت گلدان‌ها با استفاده از آب مقطر و روش توزین، در محدوده ظرفیت مزرعه نگه داشته شد و از هر گونه آبشویی و خروج محلول از زهکش گلدان‌ها جلوگیری شد. کلیه گلدان‌ها در طول دوره آزمایش در شرایط کنترل‌شده گلخانه (دمای ۱۵-۲۵ درجه سانتی‌گراد، نور و رطوبت مطلوب) نگهداری شدند و به‌منظور حذف اثرات موقعیت مکانی گلدان‌ها، جایگاه آن‌ها به صورت هفتگی و تصادفی جابجا شد. شصت روز پس از کاشت، میانگین ارتفاع بوته‌های هر گلدان ثبت و گیاهان از محل طوقه قطع و ریشه‌ها به دقت از خاک هر گلدان جداسازی شد. ریشه‌ها و شاخساره‌ها بعد از شستشو با آب مقطر، برای تعیین وزن ریشه و شاخساره خشک، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت در آون تهویه‌دار خشک و سپس توزین شدند. خاک هر یک از گلدان‌ها برای تعیین کربنات کلسیم معادل به روش خثی‌سازی با اسید، کربن آلی به روش والکلی بلک، فسفر قابل جذب به روش اولسن، پتاسیم

سه کیلوگرم از هر نمونه خاک مورد مطالعه با مقادیر مورد نظر از گوگرد و باکتری تیوباسیلوس مخلوط و به داخل گلدان‌های ۵ کیلوگرمی ریخته شد. گوگرد عنصری مورد استفاده در این آزمایش از نوع پودر معدنی (تهیه شده از معادن آذرشهر) با خلوص ۹۹/۵ درصد و اندازه ذرات ۱۵۰ میکرومتر بود. مایه تلقیح میکروبی مورد استفاده، یک فرآورده تجاری به‌صورت پودر مرطوب حاوی سلول‌های زنده باکتری *Thiobacillus spp.* تثبیت‌شده بر روی یک بستر معدنی بود که بر اساس اعلام سازنده، از تراکم اولیه 10^7 CFU g⁻¹ (معادل ۱۰ میلیون سلول در هر گرم) برخوردار بود. میزان پودر مصرفی برای تلقیح، معادل ۲ درصد وزنی گوگرد عنصری به کار رفته در نظر گرفته شد که براساس وزن کل پودر (شامل سلول‌های باکتری و ماده حامل) محاسبه گردید. سپس رطوبت خاک هریک از گلدان‌ها به ظرفیت مزرعه‌ای رسانده و به مدت ۱۵ روز نگهداری شد. سپس کود اوره به اندازه ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در داخل آب مقطر حل و به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً با خاک مخلوط شد. ۱۵ عدد بذر جوانه‌دار شده گندم رقم

EC و فسفر قابل جذب و همچنین بر ارتفاع بوته، وزن خشک شاخساره و نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره در سطح احتمال یک درصد ولی بر پتاسیم قابل جذب در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) معنی دار بود و بر کربن آلی خاک و وزن خشک ریشه گیاه اثر معنی دار نداشت. اثرات متقابل نوع خاک و گوگرد بر EC و فسفر قابل جذب خاک و وزن خشک ریشه گیاه در سطح احتمال یک درصد و بر پتاسیم قابل جذب خاک و نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود (جدول ۲ و ۳).

قابل جذب به روش استات آمونیوم، pH و EC (۹)، هواخشک و سپس از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. مقایسه میانگین ها با آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و تحلیل آماری داده ها با استفاده از نرم افزار SAS ویرایش 9.4 انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع خاک بر همه ویژگی های مورد مطالعه خاک (جدول ۲) و گیاه (جدول ۳) در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی دار بود. همچنین اثر سطوح مختلف گوگرد عنصری بر درصد آهک، pH،

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر گوگرد عنصری بر ویژگی های شیمیایی خاک های مورد مطالعه.

Table 2. Analysis of variance (ANOVA) of the effect of elemental sulfur on chemical properties of the studied soils.

میانگین مربعات Mean squares						درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V
Av. P	Av. K	EC _e	pH	TNV %	OC %		
5.169**	258363**	1.992**	0.035**	3148.47**	0.384**	3	Soil
0.594**	775.87*	0.225**	0.026**	18.47**	0.019	3	Sulfur
0.542**	450.77*	0.030**	0.006	0.55	0.011	9	Soil×Sulfur
0.077	205.60	0.005	0.005	0.953	0.007	32	Error
10.10	4.55	4.14	0.92	4.86	8.23	–	C.V.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر گوگرد عنصری بر وزن خشک شاخساره (ShDW) و ریشه (RDW)، ارتفاع بوته (PH) و نسبت وزن ریشه به شاخساره خشک (RShR) گندم در خاک های مورد مطالعه.

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) of the effect of elemental sulfur on shoot dry weight (ShDW), root dry weight (RDW), plant height (PH), and root-to-shoot ratio (RShR) in the studied soils.

میانگین مربعات Mean squares				درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V.
نسبت وزن ریشه به شاخساره RShR	وزن خشک ریشه RDW	وزن شاخساره خشک ShDW	ارتفاع بوته PH		
0.088**	12.510**	14.237**	18.917**	3	Soil
0.043**	0.673	8.187**	13.139**	3	Sulfur
0.015*	1.402**	0.087	1.528	9	Soil×Sulfur
0.006	0.385	0.772	1.00	32	Error
11.16	13.15	13.05	5.42	–	C.V.

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

نتایج مقایسه میانگین

کربن آلی خاک: در خاک‌های ۲، ۳ و ۴، با افزایش سطح گوگرد تا ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، محتوای کربن آلی خاک افزایش یافت، اما مصرف ۹۰۰ میلی‌گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک منجر به کاهش کربن آلی شد (جدول ۴). از آنجا که فعالیت ریشه و ریزجانداران خاک از منابع تأمین کربن آلی خاک هستند (۱۱) و با توجه به افزایش وزن خشک ریشه در تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد در خاک‌های ۲ و ۴ (در ادامه بیش‌تر بحث خواهد شد)، به نظر می‌رسد افزایش کربن آلی در این تیمارها، تاحدی

به‌علت توسعه سیستم ریشه و افزایش ترشحات ریشه باشد. گوگرد به عنوان یک عنصر غذایی اولیه و مهم، علاوه بر اصلاح خاک، اثرات تغذیه‌ای و آنتی‌اکسیدانی داشته و می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را به‌ویژه در خاک‌های دچار کمبود مواد آلی و گوگرد، افزایش دهد (۱۲). با این حال، به عقیده محققان با توجه به این‌که عوامل زیستی و غیرزیستی زیادی بر فرایند اصلاح خاک آهکی با استفاده از گوگرد تأثیرگذار هستند، بنابراین نتایج حاصل از کاربرد گوگرد در خاک‌های با ویژگی‌های مختلف، اغلب غیرقابل پیش‌بینی بوده و نیازمند مطالعه و بررسی است (۱۳).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر گوگرد عنصری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

Table 4. Mean comparison of elemental sulfur effects on chemical properties of the studied soils.

Av. P (mg kg ⁻¹)	Av. K (mg kg ⁻¹)	EC _e (dS m ⁻¹)	pH	TNV (%)	OC (%)	Sulfur (mg kg ⁻¹)	Soil
2.70de	111.9e	1.38g	7.75dc	43.5a	0.49hi	0	Soil 1
3.03cd	97.6e	1.48fg	7.74dc	43.3a	0.44i	300	
2.00fg	105.0e	1.63de	7.72d	41.6b	0.50g-i	600	
1.50h	111.5e	1.70d	7.73d	40.9b	0.55f-h	900	
3.10b-d	408.0b	1.57ef	7.81a-d	22.4c	0.67b-d	0	Soil 2
3.27bc	406.3b	2.03bc	7.79b-d	22.1cd	0.73ab	300	
3.50ab	414.1b	2.06b	7.78b-d	21.8cd	0.77a	600	
3.33a-c	409.3b	2.05b	7.76b-d	20.6d	0.71a-c	900	
3.40a-c	285.0d	1.04i	7.92a	10.8e	0.48hi	0	Soil 3
3.00cd	322.6c	1.17h	7.85a-c	10.3e	0.53f-h	300	
3.77a	331.8c	1.18h	7.78b-d	9.3ef	0.55f-h	600	
3.13b-d	337.2c	1.17h	7.76b-d	8.0f	0.52g-i	900	
2.40ef	414.4b	1.92c	7.93a	8.7f	0.60d-f	0	Soil 4
2.27f	424.4ab	1.96bc	7.92a	7.8fg	0.66b-d	300	
1.80gh	438.6a	2.03bc	7.87ab	6.3g	0.65c-e	600	
1.77gh	424.2ab	2.26a	7.73d	4.4h	0.57e-g	900	

مقادیر هر ستون که حرف مشترکی با یکدیگر ندارند، بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۰/۰۵ تفاوت معنی‌دار با هم دارند.

کربنات کلسیم معادل خاک: در هر ۴ خاک مورد مطالعه، با افزایش سطح گوگرد، مقدار کربنات کلسیم معادل خاک روند کاهشی نشان داد؛ اگرچه شدت این کاهش در خاک‌های مختلف متفاوت بود (جدول ۴). در خاک ۱ بیش‌ترین کاهش کربنات کلسیم در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد مشاهده شد که به‌طور معنی‌دار کم‌تر از تیمار شاهد و سطح ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد بود. در خاک ۲ و ۳ تنها در سطح ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد، کاهش معنی‌دار کربنات کلسیم نسبت به تیمار شاهد ثبت شد. خاک ۴ بیش‌ترین حساسیت را به گوگرد مصرفی نشان داد؛ به‌طوری که مقدار کربنات کلسیم در سطح ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد کمتر از سطح ۶۰۰ و ۳۰۰ و در آن دو کم‌تر از تیمار شاهد بود. فرآیند اکسایش گوگرد در خاک و واکنش یون‌های سولفات با کربنات کلسیم علاوه‌بر این که باعث کاهش pH خاک می‌شود، با افزایش حلالیت کربنات کلسیم، محتوای آن را در خاک کاهش می‌دهد (۱۴). کاهش شدیدتر کربنات کلسیم خاک ۴ احتمالاً به دلیل ظرفیت بافری پایین‌تر آن در مقایسه با خاک‌های با کربنات کلسیم بیش‌تر است. در خاک‌های کم‌آهک، اسید حاصل از فعالیت اکسیدکنندگی باکتری‌های تیوباسیلوس، تأثیر قوی‌تری بر تجزیه کربنات‌های باقی‌مانده داشت. در مقابل، خاک‌های ۱، ۲ و ۳ به‌دلیل محتوای کربنات کلسیم بیش‌تر، ظرفیت بافری بالاتری در مقابل اسید تولیدشده داشتند. این ویژگی باعث شد فعالیت باکتری‌ها عمدتاً صرف خشی‌سازی این بافر قوی شود و در نتیجه، کاهش کربنات کلسیم در آن‌ها با شیب ملایم‌تری در مقایسه با خاک‌های کم‌آهک صورت گیرد. داوودی و همکاران (۲۰۱۸) بیش‌ترین تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را در مرحله ساقه رفتن گندم مشاهده کرده و به این نتیجه رسیدند که بعد از برداشت محصول، تغییرات ایجاد شده به علت ظرفیت بافری زیاد خاک‌ها کاهش یافته و به مقادیر اولیه خود نزدیک شد (۱۵).

pH خاک: در کلیه خاک‌های مورد مطالعه با افزایش سطح گوگرد مصرفی، روند کلی کاهش pH مشاهده شد، اگرچه این کاهش در خاک‌های ۱ و ۲ از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴). در خاک ۳، بیش‌ترین مقدار pH در تیمار شاهد ثبت شد که به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از سایر تیمارهای حاوی گوگرد بود. خاک ۴ که کمترین مقدار کربنات کلسیم را داشت، بیش‌ترین حساسیت را به کاربرد گوگرد نشان داد. در این خاک، سطح ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد، pH خاک را نسبت به تیمار شاهد و سایر سطوح گوگرد به طور معنی‌دار کاهش داد. خاک‌های ۱ و ۲ به دلیل ظرفیت بافری بیش‌تر، تغییرات pH کم‌تری را در پاسخ به کاربرد گوگرد نشان دادند؛ به طوری که کاربرد گوگرد حتی تا سطح ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم، تأثیر قابل‌توجهی بر pH خاک نداشت. کاهش pH خاک با کاربرد گوگرد عنصری توسط محققان متعددی گزارش شده است (۳، ۱۶، ۱۷). با این حال، برخی گزارش‌ها نیز عدم تأثیر معنی‌دار گوگرد بر pH خاک را گزارش کرده‌اند.

EC خاک: در خاک ۱، سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد موجب افزایش معنی‌دار EC نسبت به سطح ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم و تیمار شاهد شد (جدول ۴). در خاک‌های ۲، ۳ و ۴، تمامی سطوح گوگرد موجب افزایش معنی‌دار EC نسبت به تیمار شاهد شدند. افزایش EC خاک در پاسخ به کاربرد گوگرد می‌تواند ناشی از اکسیداسیون گوگرد و تشکیل یون‌های سولفات (SO_4^{2-})، آزادسازی یون‌ها از جمله کلسیم (Ca^{2+}) بر اثر واکنش اسید سولفوریک با کربنات‌ها و بی‌کربنات‌های کلسیم و منیزیم و حلالیت املاح معدنی خاک بر اثر کاهش pH باشد (۴، ۱۵). در خاک ۱، افزایش EC تنها در سطوح بالای گوگرد (۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) معنی‌دار بود که احتمالاً به دلیل ظرفیت بافری بالاتر و آزادسازی تدریجی یون‌ها می‌باشد؛ اما در خاک‌های با کربنات کلسیم کمتر (خاک‌های ۲، ۳ و ۴)، حتی سطوح پایین

گوگرد (۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) نیز موجب افزایش معنی‌دار EC خاک شد که نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر این خاک‌ها به کاربرد گوگرد است. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (۱۵، ۱۸، ۱۹). البته تغییرات EC خاک نیز همانند تغییرات سایر ویژگی‌های شیمیایی خاک، بعد از افزودن گوگرد به خاک در طول زمان تغییر می‌کند. به عنوان مثال، الکولی و همکاران (۲۰۱۴) مشاهده کردند که گوگرد عنصری در مرحله ساقه رفتن گندم ضمن افزایش سولفات، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک، هدایت الکتریکی خاک را نیز افزایش داد؛ اما این تغییرات پس از برداشت محصول، به‌علت ظرفیت بافری زیاد خاک، به حالت اولیه خود بازگشت (۲۰).

پتاسیم قابل جذب خاک: در تمامی خاک‌های مورد مطالعه، روند کلی افزایش پتاسیم قابل جذب با افزایش سطح گوگرد مشاهده شد (جدول ۴). با این حال، این افزایش در خاک‌های ۱ و ۲ از نظر آماری معنی‌دار نبود. در خاک ۳، محتوای پتاسیم قابل جذب در تیمار شاهد به طور معنی‌دار کمتر از تمامی تیمارهای حاوی گوگرد بود و تفاوت آماری معنی‌دار بین سطوح مختلف گوگرد مشاهده نشد. در خاک ۴ سطح ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد موجب افزایش معنی‌دار پتاسیم قابل جذب نسبت به سایر سطوح گوگرد و تیمار شاهد شد. افزایش پتاسیم قابل جذب در خاک‌های مورد مطالعه ممکن است به کاهش pH خاک بر اثر اکسیداسیون گوگرد و افزایش حلالیت ترکیبات حاوی پتاسیم، رقابت یون‌های H^+ با کاتیون‌های جذب شده بر روی سطوح ذرات خاک و آزادسازی پتاسیم به محلول خاک و یا تشکیل کمپلکس‌های آلی-معدنی بر اثر فعالیت‌های افزایش یافته میکروبی، مربوط باشد (۱۵، ۲۱). البته برداشت عناصر از جمله پتاسیم توسط گیاه نیز می‌تواند تغییرات شکل قابل جذب آن‌ها را در خاک تحت تأثیر قرار دهد.

فسفر قابل جذب خاک: در خاک ۱ و ۴، محتوای فسفر قابل جذب در تیمار شاهد و سطح ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۴). در خاک ۲، تفاوت آماری معنی‌دار در محتوای فسفر قابل جذب بین تیمار شاهد و سطوح مختلف گوگرد مشاهده نشد. در خاک ۳، سطح ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد موجب افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب نسبت به سطوح ۳۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم شد، اما با تیمار شاهد تفاوت معنی‌دار نداشت. مقدار فسفر قابل‌استفاده خاک‌های مورد آزمایش، بسیار کم‌تر از حد بحرانی فسفر برای گندم بود (جدول ۱). بنابراین انتظار می‌رفت که مصرف گوگرد در مقایسه با شاهد با کاهش موضعی pH خاک و افزایش حلالیت ترکیبات حاوی فسفر موجود در خاک، سبب افزایش غلظت فسفر قابل استفاده شود؛ اما فسفر به عنوان یکی از عناصر اصلی غذایی گیاهان، رفتار بیوشیمیایی پیچیده‌ای در خاک دارد که تحت تأثیر متقابل عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی خاک، فعالیت‌های میکروبی و اثرات ریزوسفری قرار می‌گیرد (۲۲). از مکانیسم‌های مؤثر بر مقدار فسفر قابل جذب در خاک‌های با محتوای کربنات کلسیم کم، می‌توان به کاهش pH ناشی از اکسیداسیون گوگرد اشاره کرد. در مقابل، در خاک‌های با محتوای کربنات کلسیم زیاد، تشکیل ترکیبات کلسیم-فسفات با حلالیت کم (مانند هیدروکسی آپاتیت) در pHهای قلیایی، فراهمی کم فسفر عامل اصلی محدودکننده محسوب می‌شود (۲۳). البته رقابت آنیون سولفات با فسفات در جذب توسط ذرات خاک نیز می‌تواند بر مقدار فسفر قابل جذب خاک مؤثر باشد. علاوه بر آن، ممکن است در مراحل ابتدایی افزودن گوگرد به خاک و رشد گیاه، گوگرد تغییرات شدیدتری را در خاک ایجاد کرده ولی این تغییرات تا مرحله بعد از برداشت گیاه، به علت ظرفیت بافری زیاد خاک، به تدریج به حالت اولیه

کاربرد ۹۰۰ میلی گرم گوگرد، وزن خشک شاخساره را نسبت به سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم به طور معنی دار کاهش داد، اما با تیمار شاهد تفاوت معنی دار نداشت. با این حال، در خاک ۴، هیچ تفاوت معنی داری بین سطوح مختلف گوگرد و تیمار شاهد مشاهده نشد. کاهش رشد گیاه در سطح ۹۰۰ میلی گرم گوگرد احتمالاً به سمیت سولفات یا اختلال در جذب عناصر غذایی (مانند کلسیم و منیزیم) به دلیل رقابت های یونی و یا کاهش فعالیت آنزیم های مرتبط با رشد گیاهی ناشی از زیادی گوگرد در خاک مربوط باشد. اردم و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که کاربرد گوگرد بسته به ویژگی های خاک به خصوص مقدار گوگرد قابل استفاده، می تواند رشد و عملکرد گیاه را افزایش دهد و خاک هایی که مقدار گوگرد قابل استفاده کمتری دارند، اثر گوگرد مصرفی بر رشد و عملکرد گیاه در آن ها بیش تر می باشد (۲۵).

خود بازگشته اند. ایمران و همکاران (۲۰۱۴) (۲۴) و داوودی و همکاران (۲۰۱۸) (۱۵) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند.

وزن شاخساره خشک: در هر چهار خاک مورد مطالعه، با افزایش سطوح گوگرد تا ۶۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم، وزن خشک شاخساره افزایش یافت و سپس با افزایش گوگرد مصرفی از ۶۰۰ به ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک، وزن خشک شاخساره کاهش یافت (جدول ۵). در خاک ۱، وزن خشک شاخساره در سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم گوگرد تفاوت معنی دار با تیمار شاهد نداشت و کمترین وزن خشک شاخساره در سطح ۹۰۰ میلی گرم گوگرد مشاهده شد که به طور معنی دار کم تر از سایر تیمارها بود. در خاک ۲، کاربرد ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک، وزن خشک شاخساره را نسبت به تیمار شاهد و سطح ۹۰۰ میلی گرم به طور معنی دار افزایش داد. در خاک ۳،

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر گوگرد عنصری بر وزن خشک شاخساره (ShDW) و ریشه (RDW)، ارتفاع بوته (PH) و نسبت وزن ریشه به شاخساره خشک (RShR) در خاک های مورد مطالعه.

Table 5. Mean comparison of elemental sulfur effects on shoot dry weight (ShDW), root dry weight (RDW), plant height (PH), and root-to-shoot ratio (RShR) in the studied soils.

Soil	Sulfur (mg kg ⁻¹)	وزن شاخساره خشک (g pot ⁻¹)	وزن خشک ریشه (RDW) (g pot ⁻¹)	میانگین ارتفاع بوته (pH) (cm)	نسبت وزن خشک ریشه به شاخساره (RShR)
Soil 1	0	7.47a-d	5.20bc	17.7d-f	0.70c-e
	300	7.85a-c	5.86ab	18.3cd	0.75b-d
	600	6.81c-e	4.85b-e	17.3d-g	0.71c-e
	900	5.24fg	3.94e-g	16.0g	0.75b-d
Soil 2	0	6.61c-f	4.07d-f	18.3cd	0.62d-f
	300	8.56ab	4.71c-e	20.7ab	0.55f
	600	8.81a	5.20bc	21.7a	0.59ef
	900	7.25b-d	5.42bc	18.0c-e	0.75bc
Soil 3	0	5.25fg	3.93e-g	16.3fg	0.76bc
	300	6.09d-f	3.25fg	18.3cd	0.53f
	600	5.65ef	3.09fg	18.3cd	0.55f
	900	3.90g	2.96g	16.7e-g	0.76bc
Soil 4	0	6.68c-f	4.99b-d	19.3bc	0.75bc
	300	7.48a-d	5.816ab	20.0b	0.78a-c
	600	7.82a-c	6.596a	20.0b	0.85ab
	900	6.30d-f	5.596a-c	18.3cd	0.89a

مقادیر هر ستون که حرف مشترکی با یکدیگر ندارند، بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۰/۰۵ تفاوت معنی دار با هم دارند

وزن خشک ریشه: در خاک ۱، وزن خشک ریشه در سطح ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد به طور معنی دار کم تر از سطح ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم و تیمار شاهد بود (جدول ۵) که می تواند ناشی از تجمع سولفات و ایجاد تنش اسمزی، اختلال در جذب عناصر غذایی به دلیل تغییرات pH و یا سمیت مستقیم یون سولفات در غلظت زیاد گوگرد باشد. در خاک ۲، وزن خشک ریشه در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد به طور معنی دار بیش تر از تیمار شاهد بود. افزایش وزن ریشه در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد در خاک ۲ ممکن است به دلیل بهبود فراهمی فسفر و سایر عناصر غذایی، تحریک رشد ریشه برای جستجوی عناصر غذایی و همچنین افزایش فعالیت میکروبی در ریزوسفر باشد. در خاک ۳، تفاوت آماری معنی دار بین تیمارهای مختلف گوگرد مشاهده نشد. در خاک ۴، وزن خشک ریشه در سطح ۶۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد به طور معنی دار بیش تر از تیمار شاهد بود.

ارتفاع بوته: تغییرات ارتفاع بوته با کاربرد سطوح مختلف گوگرد، روند مشابه با تغییرات وزن خشک شاخساره نشان داد؛ به طوری که در هر چهار خاک مورد مطالعه، ارتفاع بوته با افزایش سطوح گوگرد ابتدا افزایش و سپس با افزایش گوگرد مصرفی به ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک، کاهش یافت (جدول ۵). در خاک ۱، ارتفاع بوته در سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم گوگرد با تیمار شاهد تفاوت معنی دار نداشتند ولی سطح ۹۰۰ میلی گرم گوگرد، کم ترین ارتفاع بوته را داشت و به طور معنی دار کم تر از سایر تیمارها بود. در خاک های ۲ و ۳، سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم گوگرد، ارتفاع بوته را نسبت به تیمار شاهد و سطح ۹۰۰ میلی گرم به طور معنی دار

افزایش دادند. در خاک ۴، سطح ۹۰۰ میلی گرم گوگرد، ارتفاع بوته را به طور معنی دار نسبت به سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم کاهش داد، اما با تیمار شاهد تفاوت آماری معنی دار نداشت. همخوانی تغییرات ارتفاع بوته با وزن خشک شاخساره نشان دهنده تأثیر مستقیم گوگرد بر رشد رویشی گندم است. این همبستگی بالا مؤید آن است که پارامترهای رشد رویشی پاسخ مشابهی به سطوح مختلف گوگرد نشان می دهند. میرزاپور و همکاران (۲۰۱۸) با کاربرد مقادیر صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار به همراه ۲ درصد مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس گزارش کردند که با کاربرد گوگرد و در نتیجه افزایش زیست فراهمی فسفر، آهن و روی عملکرد کلزا افزایش یافت (۱۷).

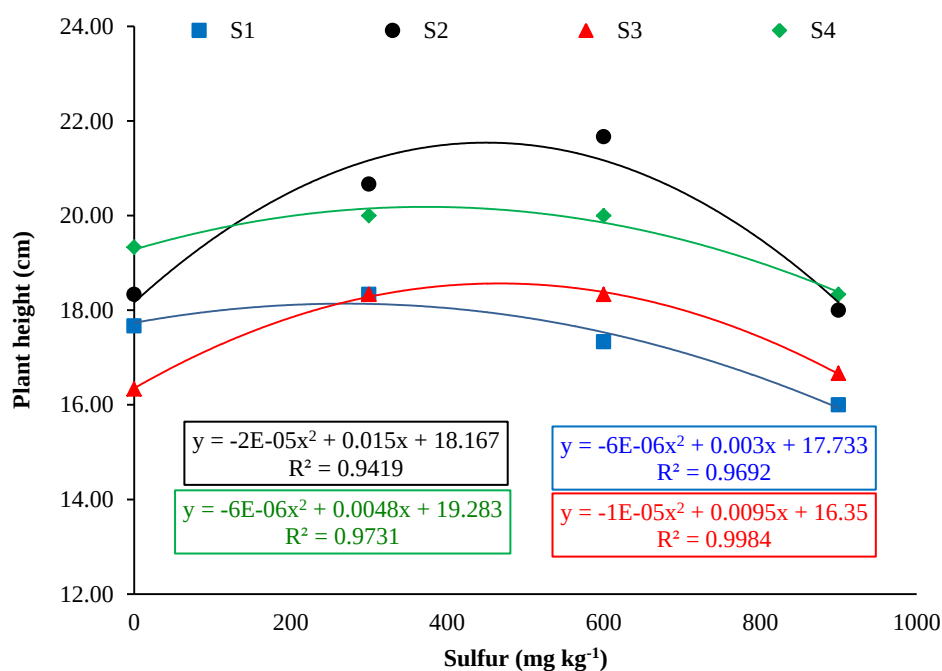
روابط رگرسیونی: بررسی روابط رگرسیونی برازش یافته بین سطوح گوگرد مصرفی و ارتفاع بوته (شکل ۱) نشان داد که رابطه بین محتوای آهک خاک و مقدار بهینه گوگرد، یک رابطه ساده و خطی نیست. مقادیر بهینه گوگرد برای دستیابی به حداکثر ارتفاع بوته در خاک های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۲۵۰، ۳۷۵، ۴۷۵ و ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود. این در حالی است که مقادیر بهینه گوگرد برای حداکثر وزن خشک شاخساره (شکل ۲) به ترتیب ۲۳۰، ۴۷۵، ۳۵۷ و ۴۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم خاک محاسبه شد. بنابراین، میزان آهک بیش تر، لزوماً به معنای نیاز به گوگرد بیش تر برای دستیابی به پاسخ مطلوب گیاه نیست. به نظر می رسد وابستگی غیرخطی پاسخ های رشدی گندم به سطوح گوگرد، تحت تأثیر سایر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک، از جمله ظرفیت بافری خاک قرار دارد که تنها توسط محتوای آهک تعیین نمی شود. علت کاهش رشد گیاه در

تیمار شاهد و سطوح پایین گوگرد را می‌توان به محدودیت دسترسی به عناصر غذایی ازجمله فسفر و عناصر کم‌مصرف نسبت داد که در شرایط pH بالا و غلظت زیاد یون کلسیم ناشی از آهک، به شکل غیرقابل جذب درمی‌آیند. از طرف دیگر، در سطوح بالای گوگرد، اگرچه کاهش pH منجر به افزایش فراهمی فسفر و پتاسیم شد، اما احتمالاً افزایش شوری و سایر پیامدهای منفی ناشی از تجمع یون سولفات اثرات منفی بر رشد گیاه داشته است. احتمالاً در خاک‌های با محتوای کربنات کلسیم بالا (خاک‌های ۱ و ۲)، اثرات بافری خاک موجب تعدیل تغییرات pH و کاهش قابل توجه اثرات منفی سطوح بالای گوگرد شده است. بر اساس یافته‌ها، خاک ۲ با بیش‌ترین پاسخ مثبت به کاربرد گوگرد در هر دو شاخص ارتفاع بوته و وزن خشک شاخساره، به عنوان خاکی با پتانسیل پاسخگویی بالا به اصلاح با گوگرد شناسایی شد. بنابراین، به‌طورکلی در اغلب خاک‌ها با مقدار کربنات کلسیم متفاوت برای دستیابی به بیش‌ترین عملکرد گندم می‌توان مقادیر ۲۳۰ تا ۴۷۵ میلی‌گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک را در شرایط مشابه توصیه کرد.

نتیجه‌گیری کلی

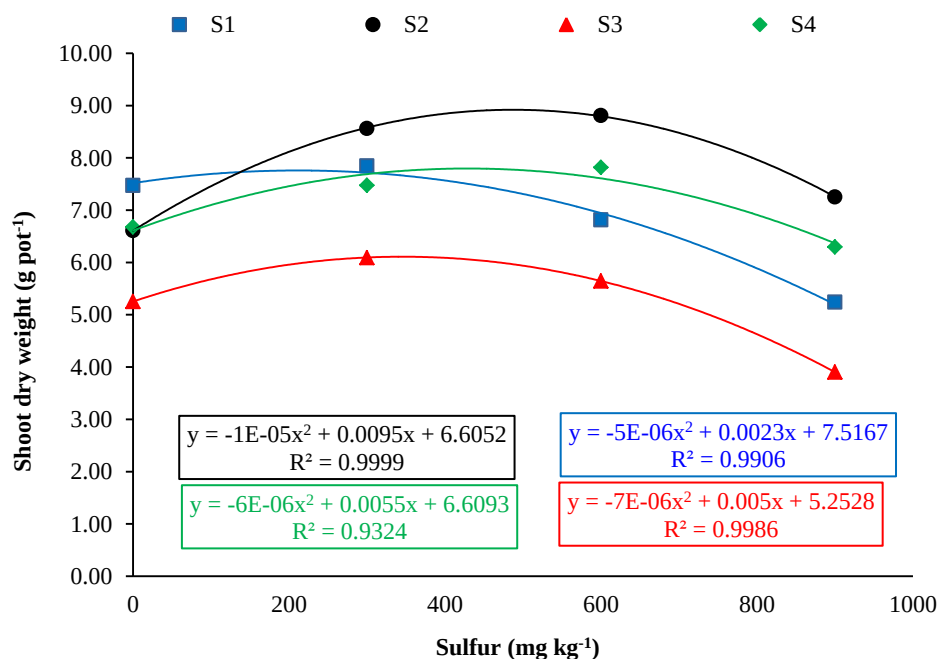
نتایج نشان داد که به‌طورکلی، گوگرد می‌تواند اثرات پیچیده و چندبعدی بر سیستم خاک-گیاه بگذارد و این اثرات به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های

خاک، به‌ویژه محتوای کربنات کلسیم و ظرفیت بافری آن قرار می‌گیرد. اگرچه در تمامی خاک‌ها کاهش کربنات کلسیم معادل با افزایش سطح گوگرد مشاهده شد، اما شدت این کاهش و در نتیجه مقدار بهینه گوگرد برای دستیابی به حداکثر عملکرد گندم، در خاک‌های مختلف به صورت غیرخطی متغیر بود. خاک‌های با کربنات کلسیم کمتر (خاک ۴) حساسیت بیش‌تری به کاربرد گوگرد نشان دادند، در حالی که خاک‌های حاوی کربنات کلسیم زیاد (خاک‌های ۱ و ۲) به دلیل ظرفیت بافری بالاتر، تغییرات کم‌تری نشان دادند. در تمام خاک‌ها، سطوح متوسط گوگرد (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) موجب بهبود رشد رویشی (وزن خشک شاخساره و ارتفاع بوته) و توسعه سیستم ریشه شد، در حالی که سطوح بالاتر (۹۰۰ میلی‌گرم) اثرات منفی نشان داد. این الگو به‌ویژه در خاک‌های با کربنات کلسیم متوسط (خاک‌های ۲ و ۳) بیش‌ترین تأثیر مثبت را داشت. مدل‌های رگرسیونی، مقادیر بهینه متفاوتی از گوگرد را برای خاک‌های مختلف نشان دادند، اما به‌طورکلی، می‌توان محدوده ۲۳۰-۴۷۵ میلی‌گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک را به‌عنوان توصیه عمومی برای دستیابی به عملکرد مطلوب گندم در خاک‌های حاوی مقادیر مختلف کربنات کلسیم پیشنهاد کرد که با فرض عمق توسعه ریشه برابر ۲۰ سانتی‌متر و وزن مخصوص خاک ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به ترتیب معادل ۵۹۸-۱۲۳۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشد.



شکل ۱- رابطه رگرسیونی بین ارتفاع بوته و سطوح گوگرد مورد استفاده. مدل رگرسیونی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

Figure 1. Regression relationship between plant height and applied sulfur levels. The regression model was significant at the 5% probability level.



شکل ۲- رابطه رگرسیونی بین وزن خشک شاخساره و سطوح گوگرد مورد استفاده. مدل رگرسیونی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

Figure 2. Regression relationship between shoot dry weight and sulfur application rates. The regression model was statistically significant ($p < 0.05$).

منابع

1. Khavazi, K., Jahandideh mahjan abadi, V. A. & Taghipoor, F. (2018). Effect of sulfur, *Thiobacillus* bacteria and phosphorus on the yield and nutrient elements uptake of wheat in calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(2), 23-41. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/ejsms.2018.13665.1761>.
2. Zhou, Y., Wang, D., Zhu, J., Liu, Q., & Fan, M. X. (2004). The role of sulfur fertilizers in balanced fertilization. In: Proceedings of the 1st Sino-German Workshop on Aspects of Sulfur Nutrition of Plants 23-27 May. p. 171-6.
3. Karimi, E., & Mosavi, S. B. (2023). Short-term effects of organic manure, sulfur, and sulfo-barvar-1 biofertilizer on some biological properties of a calcareous soil. *Water and Soil Science*, 33(2), 203-19. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.46771.2421>. [In Persian]
4. Stamford, N. P., Figueiredo, M. V. B., da Silva Junior, S., Freitas, A. D. S., Santos, C. E. R. S., & Junior, M. A. L. (2015). Effect of gypsum and sulfur with *Acidithiobacillus* on soil salinity alleviation and on cowpea biomass and nutrient status as affected by PK rock biofertilizer. *Scientia Horticulturae*, 192, 287-92. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.008>.
5. Najafi, S., H. Mirseyed Hosseini, H., & Alaei, E. (2012). Study of the effect of micronutrient enriched sulfur fertilizer application in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 26(1), 95-103. <https://sid.ir/paper/141795/en>. [In Persian]
6. Jaggi, R. C., Aulakh, M. S., & Sharma, R. (2005). Impacts of elemental S applied under various temperature and moisture regimes on pH and available P in acidic, neutral and alkaline soils. *Biology and Fertility of Soils*. 41(1), 52-8. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0792-9>.
7. Besharti, H., & Malekzadeh, T. (2015). The effect of sulfur and *Thiobacillus* on growth and nutrient uptake of soybean plants in several calcareous soils with different buffering capacities. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 29(2), 132-146. <https://sid.ir/paper/158917/en>. [In Persian]
8. Karimi, F., Bahmanyar, M. A., & Shahabi, M. (2012). Improving the Content of Oil, Protein and Some Yield Components of Canola in two Calcareous Soil, Consequence the Sulfur and Cattle Manure Application. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 22(3), 71-85 [In Persian]
9. Dane, J. H., & Topp, C. G. (Eds.). (2020). Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods. John Wiley & Sons.
10. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (2020). Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods (Vol. 14). John Wiley & Sons.
11. Azimzadeh, Y., Shirvani, M., & Shariatmadari, H. (2016). Rhizosphere and green manure effects on soil chemical attributes and metal bioavailability as a function of the distance from plant roots in mono and mixed corn and canola cultures. *Archive Agronomy and Soil Science*. 62(8), 1066-81. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1110576>.
12. Cakilli, H., Ates, O., Taspinar, K., & Kizilaslan, F. (2025). Impacts of elemental sulfur application on soil microbial activity in alkaline calcareous soil. *Geomicrobiol Journal*, 1-5. <https://doi.org/10.1080/01490451.2025.2490032>.
13. Abd El-Aziz, M. A., Abd Elghany, S. H., Elbagory, M., El-Gamal, B. A., AbdEl-Khalek, A. A., AbdEL-& Azeem, S. M. (2025). Enhancing soil health and crop performance under saline-sodic calcareous soil: A comparative study of nano-sulfur and mineral sulfur combined with compost application. *Agronomy*, 15(3), 510. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030510>.

14. Germida, J. J., Wainwright, M., & Gupta, V. V. S. R. (2021). Biochemistry of sulfur cycling in soil. In: Soil biochemistry. CRC Press. p. 1–53.
15. Davoodi, M. H., Ghaderi, J., & Khavazi, K. (2018). Effect of sulfur on some chemical properties of soil and nutrients concentration in wheat grain (*Triticum astivum* L.). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(5), 265-80. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.14774.2979>. [In Persian]
16. Kaplan, M., & Orman, S. (1998). Effect of elemental sulphur and sulphur containing waste in a calcareous soil in Turkey. *Journal of Plant Nutrition*, 21(8), 1655-65. <https://doi.org/10.1080/01904169809365511>.
17. Mirzapour, M. H., Khavazi, K., & Naeini, M. R. (2018). Effect of sulfur, *Thiobacillus* and phosphorous application on canola yield and some soil chemical characteristics. *Journal of Sol Biology*, 5(2), 109-21. <https://doi.org/10.22092/sbj.2018.115683>. [In Persian]
18. El-Fatah, M. S., & Khaled, S. M. (2010). Influence of organic matter and different rates of sulfur and nitrogen on dry matter and mineral composition of wheat plant in new reclaimed sandy soil. *Journal of American Science*, 6(11), 1078-84.
19. El-Tarabily, K. A., Soaud, A. A., Saleh, M. E., & Matsumoto, S. (2006). Isolation and characterization of sulfur-oxidizing bacteria, including strains of *Rhizobium*, from calcareous sandy soils and their effects on nutrient uptake and growth of maize (*Zea mays* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(1), 101-11. <https://doi.org/10.1071/AR04237>.
20. El-Kholy, A. M., Ali, O. M., El-Sikhry, E. M., & Mohamed, A. I. (2013). Effect of sulphur application on the availability of some nutrients in Egyptian soils. *Egyptian Journal of Soil Science*, 53(3), 361-77. <https://doi.org/10.21608/ejss.2013.173>.
21. Rahman, M. M., Soaug, A. A., Darwish, F. H. A., Golam, F., & Sofian-Azirun, M. (2011). Growth and nutrient uptake of maize plants as affected by elemental sulfur and nitrogen fertilizer in sandy calcareous soil. *African journal of biotechnology*, 10(60), 12882-9. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2075>.
22. Islam, M., Siddique, K. H. M., Padhye, L. P., Pang, J., Solaiman, Z. M., & Hou, D. (2024). A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. *Advances in Agronomy*, 185, 153-249. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>.
23. Zhang, H., Yang, Y., Chen, F., Liu, D., Zhu, R., & Wu, S. (2024). Removal and recovery of phosphorus by a long-term stabilized amorphous calcium carbonate. *Separation and Purification Technology*, 350, 127956. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127956>.
24. Imran, M., Sajida, P., Amjad, A., & Fayaz, A. (2014). Influence of sulfur rates on phosphorus and sulfur content of maize crop and its utilization in soil. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 3(11), 1194-200.
25. Erdem, H., Torun, M. B., Erdem, N., Tolay, I., Günal, E., & Özkutlu, F. (2016). Effects of different forms and doses of sulphur application on wheat. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 4(11), 957-61. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i11.957-961.837>.

