

ارزیابی کارایی گوگرد و کود دامی در کاهش محدودیت خاک‌های آهکی و افزایش عملکرد گندم دیم

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

۱- مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران.

۲- سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران.

چکیده مبسوط

مقدمه: رشد و نمو گیاه در خاک‌های آهکی و همچنین در لکه‌های آهکی خاک‌ها با محدودیت‌های متعددی مواجه است. گوگرد به‌عنوان یک عنصر غذایی ضروری، علاوه بر نقش تغذیه‌ای، با کاهش pH، اثرات مثبتی بر ویژگی خاک‌های آهکی دارد؛ به‌همین علت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد اسیدزا برای اصلاح خاک‌های آهکی و بهبود تغذیه گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر گوگرد معدنی و باکتری اکسیدکننده گوگرد (تیوباسیلوس با جمعیت بیشتر از ۱۰۷ سلول در هر گرم) در ترکیب با کود دامی پوسیده بر خصوصیات دو نوع خاک آهکی و عملکرد گندم دیم انجام شد.

روش شناسی پژوهش: آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در یکی از مزارع دیم شهرستان هشترود در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل دو نوع خاک شامل خاک کم‌آهک (۲۲ درصد) و خاک پرآهک (۳۹ درصد) به‌عنوان فاکتور اصلی و پنج سطح اصلاح‌کننده خاک شامل گوگرد + تیوباسیلوس (S+TB)، گوگرد + تیوباسیلوس + کود دامی (S+TB+FM)، گوگرد + کود دامی (S+FM)، کود دامی (FM) و تیمار شاهد (C) به‌عنوان فاکتور فرعی بودند. کود دامی به میزان ۴ تن در هکتار، گوگرد به میزان ۱ تن در هکتار و باکتری تیوباسیلوس به میزان ۲ درصد وزن گوگرد مصرفی استفاده شد و شاخص‌های رشد شامل ارتفاع بوته، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در هکتار تعیین شد. همچنین، ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند pH، هدایت الکتریکی (EC)، میزان کربنات کلسیم، کربن آلی و فسفر و پتاسیم قابل جذب در عمق ۰ تا ۲۵ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌های پژوهش: تمامی تیمارهای اصلاحی موجب بهبود معنی‌دار عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم در هر دو نوع خاک شدند. در خاک کم‌آهک، تیمار ترکیبی S+TB+FM با کاهش معنی‌دار محتوای آهک از ۲۱ به ۱۷ درصد و pH از ۷/۶ به ۷/۲ و افزایش معنی‌دار کربن آلی از ۰/۲۷ به ۰/۴۰ درصد و فسفر قابل جذب از ۳/۵ به ۴/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مؤثرترین تیمار شناخته شد. این تغییرات منجر به بهبود معنی‌دار شاخص‌های رشد گندم شامل افزایش ارتفاع بوته از ۷۶ به ۱۰۰ سانتی‌متر، عملکرد دانه از ۱۸۵۴ به ۴۳۵۵ کیلوگرم در هکتار، عملکرد زیستی از ۵۹۸۴ به ۱۰۳۹۳ کیلوگرم در هکتار و شاخص برداشت از ۳۱ به ۴۲ درصد شد. اگرچه تیمارهای حاوی گوگرد در هر دو خاک مؤثر بودند، اما اثر کود دامی در خاک کم‌آهک بارزتر از خاک پرآهک بود. بر اساس این یافته‌ها، در خاک‌های



* نگارنده مسئول: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

کم آهک، تیمار ترکیبی S+TB+FM (شامل ۱ تن گوگرد، ۴ تن کود دامی و ۲٪ باکتری تیوباسیلوس) به عنوان راهکار بهینه برای اصلاح خاک و بهبود عملکرد گندم توصیه می‌شود.
کلمات کلیدی: تیوباسیلوس، خاک آهکی، گوگرد معدنی، گندم دیم، ماده آلی

مقدمه

مستلزم اکسایش آن در خاک می‌باشد که عمدتاً به صورت میکروبیولوژیکی و توسط باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (غالباً گروه تیوباسیلوس‌ها^۱) انجام می‌شود (Zhou et al., 2004). اکسایش میکروبی گوگرد در خاک توسط دو دسته از میکروب‌ها با فیزیولوژی متفاوت انجام می‌شود. دسته اول شیمیولیتوتروف‌ها^۲ به‌ویژه تیوباسیلوس‌ها هستند که جمعیت آن‌ها در خاک‌های آهکی به دلیل نامساعد بودن شرایط از جمله پایین بودن میزان مواد آلی، عدم کاربرد گوگرد و مایه تلقیح آن‌ها بسیار ناچیز است. دسته دوم شیمیوارگانوتروف‌هایی^۳ مانند قارچ‌ها، اکتینوباکتری‌ها^۴، باکتری‌ها و مخمرها هستند و از آنجایی که اکسایش به این شیوه نیاز به منابع کربن و انرژی دارد، در خاک‌هایی که کمبود ماده آلی دارند، افزایش ماده آلی می‌تواند موجب افزایش اکسایش گوگرد در خاک شود (Kumar et al., 2020). با این حال، تیوباسیلوس‌ها اکسیدکنندگان اصلی گوگرد هستند که شیمیولیتوتروف، گرم منفی و میله‌ای شکل بوده و انرژی مورد نیاز خود را از اکسایش گوگرد به‌دست می‌آورند. بنابراین، به‌دلیل سرعت کند اکسایش گوگرد در خاک‌های آهکی، شرط بهره‌گیری از این توان بالقوه گوگرد، افزودن باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد به خاک است؛ زیرا اگرچه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد به‌طور طبیعی در خاک‌های کشاورزی وجود دارند، اما معمولاً یا تعداد آن‌ها در خاک‌های آهکی کم است و یا باکتری‌های بومی

بازده تولید گندم در واحد سطح در ایران (به‌ویژه در اراضی دیم) پایین‌تر از میانگین جهانی است که عمدتاً ناشی از آهکی بودن و کمبود مواد آلی این خاک‌ها می‌باشد (Khavazi et al., 2018). علاوه بر آن، نقاط (لکه‌های) آهکی موجود در مزارع دیم که از مواد مادری آهکی منشأ گرفته‌اند، دارای محتوای آهک بیشتری بوده و تولید محصول در این مناطق با محدودیت بیشتری مواجه است. یکی از روش‌های کارآمد برای رفع محدودیت‌های ناشی از وجود آهک زیاد و افزایش تولید محصول در خاک‌های آهکی، افزودن گوگرد به این خاک‌ها است. سالانه بیش از یک میلیون تن گوگرد در کشور تولید می‌شود (Besharati and Motalebifard, 2016). گوگرد علاوه بر این که یک عنصر غذایی ضروری پرمصرف برای گیاهان محسوب می‌شود، نقش مؤثری در افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارد. این در حالی است که در طی سال‌های گذشته با افزایش عملکرد در واحد سطح و برداشت گوگرد توسط گیاه و عدم بازگرداندن مقادیر کافی آن به خاک، کمبود گوگرد در خاک‌ها تشدید شده است (Besharati and Motalebifard, 2016). علاوه بر آن، گوگرد عنصری با اکسید شدن در خاک، به ازای هر یون سولفات دو یون H^+ تولید کرده و می‌تواند pH خاک را حداقل در مقیاس کوچک در اطراف ذرات گوگرد، کاهش داده و به حل‌پذیری ترکیبات نامحلول و یا کم‌محلول عناصر غذایی در خاک کمک کند. بنابراین، اثربخشی گوگرد بر خاک

¹ Thiobacillus

² Chemolithotroph

³ Chemoorganotrophs

⁴ Actinobacteria

افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر سطوح گوگرد و باکتری، روند کاهشی در پارامترهای مذکور مشاهده شد. قادری و همکاران (Gaderi *et al.*, 2018) در پژوهشی تأثیر سطوح مختلف گوگرد (صفر، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) بر ویژگی‌های یک خاک آهکی را بررسی و گزارش کردند که کاربرد گوگرد در سطوح مختلف باعث کاهش pH و افزایش قابلیت هدایت الکتریکی و فراهمی سولفات، فسفر، آهن و روی خاک شد و با افزایش مقدار گوگرد مصرفی و زمان انکوباسیون، مقدار اکسیداسیون گوگرد کاهش یافت؛ به طوری که بیش‌ترین اکسیداسیون گوگرد با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار مشاهده شد. این پژوهشگران با توجه به نتایج به‌دست آمده، کاربرد گوگرد تا ۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار را پیشنهاد دادند.

عوامل متعددی ازجمله میزان مواد آلی خاک که فعالیت‌های میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌توانند بر اکسیداسیون گوگرد تأثیر بگذارند (Besharti adn Malekzadeh, 2015). مواد آلی می‌توانند با کاهش pH و میزان تراکم خاک و افزایش تهویه و رطوبت قابل جذب خاک، به طور غیرمستقیم فعالیت بسیاری از میکروارگانیسم‌های خاک ازجمله تیوباسیلوس‌ها را بهبود دهند. در این رابطه، کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2012) با انجام یک آزمایش گلدانی روی دو نمونه خاک آهکی مشاهده کردند که بیشترین ماده خشک گیاه کلزا با مصرف هم‌زمان گوگرد، تیوباسیلوس و کود دامی به دست آمد. نتایج پژوهش جلیلی و همکاران (Jalili *et al.*, 2013) نیز نشان داد که با افزایش گوگرد و کود دامی به خاک، عملکرد، اجزای عملکرد و درصد پروتئین گندم افزایش یافت؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان افزایش در همه صفات مورد مطالعه مربوط به مصرف ۶۰۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار بود. حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2017) اثر منابع مختلف گوگرد (گوگرد عنصری و گوگرد بنتونیتی) و کود دامی را بر رشد و عملکرد ذرت در یک خاک آهکی

موجود در این خاک‌ها کارایی لازم برای اکسید کردن گوگرد را ندارند. بدین ترتیب، کاربرد باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد به‌ویژه جنس تیوباسیلوس، مرحله مهمی از استراتژی استفاده از گوگرد برای تأمین نیاز سولفاتی گیاه، کاهش pH خاک و افزایش قابلیت جذب برخی از عناصر غذایی در خاک‌های آهکی می‌باشد (Stamford *et al.*, 2015).

نقش گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس در اصلاح ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های آهکی توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است. به عنوان مثال، نجفی و همکاران (Najafi *et al.*, 2012) با افزودن گوگرد در مقادیر ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم در هکتار همراه با مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس به یک خاک آهکی مشاهده کردند که در طی ۱۸۰ روز نگهداری نمونه‌های خاک تیمار شده، فراهمی گوگرد در خاک افزایش و pH خاک کاهش یافت. اخوان و فلاح نصرت‌آباد (Akhavan and Fallah Nosrat, 2013) نیز در یک آزمایش گلخانه‌ای، کاهش pH به میزان ۱/۰۵ واحد نسبت به خاک اولیه در نتیجه کاربرد گوگرد را مشاهده کردند. مومن و همکاران (Momen *et al.*, 2011) گزارش کردند که با افزایش گوگرد به خاک، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله، ارتفاع بوته و شاخص سطح برگ گندم به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. خاوازی و همکاران (Khavazi *et al.*, 2018) با بررسی تأثیر کاربرد گوگرد در مقادیر ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و باکتری تیوباسیلوس (۲ درصد گوگرد مصرفی) بر عملکرد و جذب عناصر غذایی در گندم در یک خاک آهکی و در شرایط مزرعه، نشان دادند که با کاربرد گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس، عملکرد و اجزای عملکرد گندم نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌دار افزایش یافت. آنان گزارش کردند که با مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد همراه با ۲۰ کیلوگرم باکتری تیوباسیلوس در هکتار عملکرد دانه، عملکرد کاه و طول خوشه نسبت به شاهد به‌ترتیب به میزان ۱۲۳، ۱۲۴ و ۳۱ درصد

مورد مطالعه قرار داده و گزارش کردند که کاربرد گوگرد (هر دو نوع) و کود دامی عملکرد و ارتفاع گیاه را افزایش داد. بنابراین، با توجه به اثرهای مثبت ماده آلی در بهبود ویژگی‌های زیستی خاک، کاربرد گوگرد به همراه ماده آلی توصیه می‌شود (Karimi and Mosavi, 2023). علی‌رغم یکسان بودن عملیات کشاورزی و مصرف سم و کود در لکه‌های آهکی و سایر قسمت‌های زمین زراعی، عملکرد و تولید محصول در لکه‌های آهکی کمتر از سایر قسمت‌های مزرعه است. با این حال، در مورد کاربرد گوگرد برای افزایش عملکرد محصول در خاک‌های آهکی اراضی دیم تحقیقات چندانی انجام نشده است. بنابراین با توجه به فراوانی و قیمت پایین گوگرد و اثرات مفید آن بر گیاهان و خاک، هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر گوگرد، باکتری تیوباسیلوس و کود دامی بر عملکرد گندم در لکه‌های آهکی مزارع دیم بود.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر مصرف گوگرد عنصری (معدنی) و باکتری اکسیدکننده گوگرد (تیوباسیلوس با جمعیت بیشتر از 10^7 سلول در هر گرم) در حضور و عدم حضور کود دامی پوسیده بر برخی از ویژگی‌های دو نمونه خاک آهکی و بهبود عملکرد گندم در شرایط دیم، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در یک مزارع دیم بهره بردار شهرستان هشتروند با موقعیت جغرافیایی $38^{\circ}23'N$ ، $50^{\circ}46'E$ و با ارتفاع ۱۸۷۲ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد.

تیمارهای آزمایش شامل دو نوع خاک کم‌آهک حاوی ۲۲ درصد آهک و پرآهک حاوی ۳۸ درصد آهک به‌عنوان فاکتور اصلی و پنج سطح اصلاح‌کننده خاک شامل گوگرد + تیوباسیلوس (S+TB)، گوگرد + تیوباسیلوس + کود دامی (S+TB+FM)، گوگرد + کود دامی (S+FM)، کود دامی (FM) و تیمار شاهد (C) به‌عنوان فاکتور فرعی بودند. کود دامی به میزان

۴ تن در هکتار، گوگرد به میزان ۱ تن در هکتار و باکتری تیوباسیلوس به میزان ۲ درصد وزن گوگرد مصرفی استفاده شد. قبل از اجرای آزمایش به منظور اطلاع از ویژگی‌های اولیه خاک محل اجرای آزمایش، از خاک دو قسمت مزرعه که دارای درصد متفاوت آهک بودند، نمونه‌هایی به روش مرکب از عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری تهیه و برخی از ویژگی‌های آن از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراژ کردن با سود، کربن آلی به روش اکسایش تر (والکلی بلک)، فسفر قابل جذب به روش اولسن و پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم تعیین شد (Dane and Topp, 2020; Sparks *et al.*, 2020). همچنین برخی از ویژگی‌های کود دامی از جمله pH و EC در عصاره پنج به یک آب به کود، کربن آلی با اکسایش تر، نیتروژن کل به روش کج‌لدال و مقادیر فسفر و پتاسیم کل در عصاره تهیه شده به روش خشک‌سوزانی و هضم با اسید کلریدریک ۲ نرمال تعیین شد (Campbell and Plank, 1998). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک برداشت شده از دو قسمت متفاوت مزرعه مورد مطالعه در جدول ۱، برخی از ویژگی‌های کود دامی مورد استفاده در جدول ۲ و داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

گندم رقم صدار با تراکم بذر ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار در کرت‌های به مساحت ۳۰۰ متر مربع با استفاده از خطی‌کار کشت گستر (هاسیا) ۱۱ ردیفه کشت شد. خاک مورد نظر از نظر پتاسیم قابل جذب وضعیت مطلوب ولی از نظر فسفر کمبود داشت. بنابراین، قبل از کاشت مقادیر ۱۲۰ و ۱۰۸ کیلوگرم در هکتار کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به ترتیب به قسمت پرآهک و کم‌آهک مزرعه و همچنین، ۸۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن از منبع اوره در هر دو قسمت مزرعه استفاده شد که همزمان با کاشت و به صورت جایگذاری در زیر بستر بذر به کار برده شدند. به دلیل ناچیز بودن جمعیت علف‌های هرز و عدم خسارت

اسیدیته (pH): نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که pH خاک در تیمارهای S+TB+FM، S+TB و FM در خاک کم‌آهک به‌طور معنی‌دار بیشتر از خاک پرآهک بود (شکل ۱) و در تیمار S+FM، همانند شاهد، اختلاف معنی‌داری بین خاک‌های کم‌آهک و پرآهک وجود نداشت. در خاک‌های پرآهک، کم‌ترین مقدار pH مربوط به تیمار S+FM بود که در مقایسه با FM و شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد که نشان‌دهنده برهم‌کنش مثبت گوگرد و کود دامی در کاهش pH خاک است. همچنین، تیمارهای S+TB و S+TB+FM نیز pH را نسبت به شاهد به‌صورت معنی‌دار کاهش دادند، در حالی که بین تیمار FM و شاهد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در خاک‌های کم‌آهک، تمامی تیمارهای اصلاح‌کننده S+TB، S+TB+FM، S+FM و FM منجر به کاهش معنی‌دار pH نسبت به شاهد شدند. در این بین، تیمار S+TB+FM بیشترین تأثیر را در کاهش pH داشت و حتی نسبت به تیمارهای FM، S+TB و شاهد نیز اختلاف معنی‌دار نشان داد که به علت برهم‌کنش مثبت گوگرد (تولید اسید)، باکتری (تسریع اکسیداسیون) و کود دامی (بهبود شرایط) در کاهش pH خاک آهکی است. با تجزیه کود دامی در خاک، گاز دی اکسید کربن تولید شده و بر اثر حل

آفات و بیماری‌ها در مزرعه مورد مطالعه، از علف‌کش و آفت‌کش استفاده نشد. در مرحله رسیدگی محصول، شاخص‌های رشد شامل ارتفاع بوته، وزن هزاردانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در هکتار تعیین شد. همچنین، ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند pH، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، میزان کربنات کلسیم، کربن آلی و فسفر و پتاسیم قابل جذب در عمق ۰ تا ۲۵ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفت (Dane and Topp, 2020; Sparks *et al.*, 2020). داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ویرایش 9.4 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع خاک (با مقدار آهک متفاوت) اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) بر کلیه صفات مورد مطالعه خاک (جدول ۴) و گیاه (جدول ۵) به‌جز شاخص برداشت داشت. همچنین، نوع اصلاح‌کننده خاک اثر معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بر تمامی صفات مورد مطالعه خاک و گیاه به‌استثنای وزن هزاردانه داشت. برهم‌کنش نوع خاک و اصلاح‌کننده بر پتاسیم قابل جذب، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و شاخص برداشت در سطح احتمال یک درصد و بر کربن آلی خاک و ارتفاع بوته در سطح احتمال پنج درصد ($p \leq 0.05$) معنی‌دار بود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied farm soil

	Texture	PH	EC (dS m ⁻¹)	TNV (%)	OC (%)	Ava. P (mg kg ⁻¹)	Ava. K (mg kg ⁻¹)
Soil 1	silty loam	7.85	668	39	0.28	2.21	194
Soil 2	silty clay loam	7.72	574	22	0.36	3.15	273

TNV: درصد مواد خنثی شونده، Ava. P: فسفر فراهم (قابل جذب)، Ava. K: پتاسیم فراهم.

TNV: Neutralizing value (%), Ava. P: Available phosphorus, Ava. K: Available potassium

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های کود دامی مورد استفاده

Table 2. Some properties of the used farmyard manure

PH	EC (dS m ⁻¹)	OC (%)	N (%)	Total P (mg kg ⁻¹)	Total K (mg kg ⁻¹)
7.9	21	25	0.94	0.36	1.08

جدول ۳- تغییرات دما و بارندگی سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و میانگین بلندمدت در منطقه مورد مطالعه

Table 3. Temperature and precipitation variations during the 2023-2024 growing season and long-term average in studied region

فصل Season	میانگین دما Mean temperature (°C)	میانگین دمای حداکثر Mean maximum temperature (°C)	میانگین دمای حداقل Mean minimum temperature (°C)	برف مذاب Snowmelt (mm)	باران Rainfall (mm)	مجموع نزولات Total precipitation (mm)
پاییز Autum n	8.5	13.4	3.4	1.5	72.3	73.8
زمستان Winter	1.1	5.1	2.9	34.7	109.4	144.1
بهار Spring	12.1	17.4	6.8	0	163.5	163.5
کل Total	7.2	12.0	4.4	36.2	345.2	381.4
بلندمدت Long- term average	7.0	11.2	2.2	-	-	361

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع خاک و اصلاح‌کننده‌های گوگرد و کود دامی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 4. Analysis of variance for effects of soil types with sulfur and manure amendments on soil characteristics

S.O.V	DF	Mean Square					
		OC	TNV	Ava. P	Ava. K	pH	EC
Block	2	0.0004	2.13	0.18	221.12	0.009	0.019
Soil (A)	1	0.0333**	1936.03**	19.06**	42195.00**	0.210**	0.324**
Error A	2	0.0006	0.93	0.03	19.78	0.003	0.002
Teatment (B)	4	0.0065**	26.13**	0.87**	1579.25**	0.084**	0.367**
Soil*Teatment	4	0.0033*	0.53	0.11	1001.67**	0.008	0.009
Error B	16	0.0005	3.03	0.04	91.37	0.005	0.008
C.V.		7.3	6.5	5.9	5.1	0.9	8.2

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

* and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع خاک و اصلاح کننده های گوگرد و کود دامی بر شاخص های عملکرد گیاه

Table 5. Analysis of variance for effects of soil types with sulfur and manure amendments on plant performance indices

S.O.V	DF	Mean Square				
		PH	Biomass	GY	HI	1000GW
Block	2	272.5	359161.6	40190.9	0.95	0.71
Soil (A)	1	2900.8**	86584438.5**	14516893.8**	5.63	18.96**
Error A	2	14.5	142925.0	6934.0	1.38	1.05
Treatment (B)	4	450.6**	10774754.3**	2759040.7**	60.91**	2.26
Soil*Treatment	4	60.8*	2872167.6**	1079029.3**	28.53**	0.50
Error B	16	23.98	37212.0	5042.7	2.56	1.29
C.V.		5.9	2.9	2.8	4.3	3.0

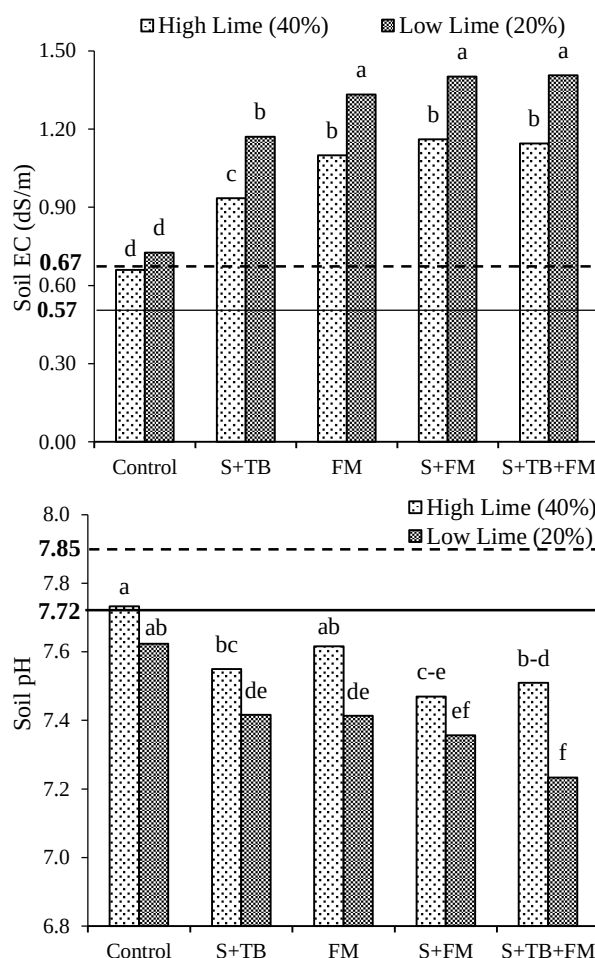
* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

* and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

روی در خاک قلیایی تثبیت می شوند (Assefa *et al.*, 2021). در حالی که در تیمار شاهد (C)، اختلاف معنی دار بین دو نوع خاک از نظر EC مشاهده نشد. این امر حاکی از آن است که کاربرد اصلاح کننده ها، به ویژه در خاک های کم آهک، تأثیر قابل توجهی بر افزایش EC خاک داشته است. بررسی EC در هر دو نوع خاک (کم آهک و پر آهک) نشان داد که بیشترین مقادیر EC به ترتیب در تیمارهای S+TB+FM، S+FM و FM مشاهده شد که به صورت معنی دار بیشتر از تیمار S+TB و شاهد بودند. احمد (Ahmed, 2008) نشان داد که کاربرد کود دامی و گوگرد عنصری به طور معنی دار pH خاک را کاهش و EC را افزایش داد. خادم و همکاران (Khadem *et al.*, 2014) نیز کاهش معنی دار pH و افزایش EC خاک با افزودن گوگرد به خاک را گزارش کردند. ارمان (Orman, 2012) گزارش کرد که کاربرد گوگرد در سطوح بالاتر از ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم باعث افزایش شوری خاک شد که می تواند برای گیاه مشکل ساز باشد. بر این اساس، توصیه می شود در کاربرد گوگرد به خاک های با EC بالا احتیاط شود.

شدن این گاز در آب خاک، اسید کربنیک تولید می شود که می تواند در خاک های با ظرفیت بافری کم، منجر به کاهش pH شود. علاوه بر آن، کود دامی حاوی اسیدهای آلی می باشد و افزودن این مواد به طور مستقیم به خاک، باعث ایجاد تغییرات خیلی کم در pH خاک می شود (Khadem *et al.*, 2014).

هدایت الکتریکی (EC): هدایت الکتریکی خاک در هر چهار تیمار S+TB، S+TB+FM، S+FM و FM در خاک کم آهک به طور معنی دار بیشتر از خاک پر آهک بود (شکل ۱) که احتمالاً به افزایش سولفات ناشی از اکسیداسیون گوگرد از یک سو و کاهش pH و در نتیجه، افزایش حل پذیری عناصر و آزاد شدن یون ها از خاک و یا از کود دامی به محلول خاک از سوی دیگر مربوط می باشد. نباتی و همکاران (Nobati *et al.*, 2015) نیز گزارش کردند که کاربرد گوگرد عنصری با کاهش pH خاک می تواند EC خاک را افزایش دهد. در حالی که در خاک با آهک زیاد، ظرفیت بافری زیاد خاک باعث تعدیل اثر اصلاح کننده ها شده و از نوسانات EC جلوگیری کرده است. علاوه بر آن، نتایج بررسی ها نشان داده است که بسیاری از عناصر از جمله فسفر، آهن، منگنز، مس و



شکل ۱- اثر متقابل گوگرد و کود دامی بر pH و EC دو خاک با آهک کم و زیاد. خط ممتد (—) و خط چین (---) به ترتیب مقادیر اولیه را در خاک‌های با آهک کم و آهک زیاد نشان می‌دهند.

Figure 1. Interactive effect of sulfur and manure amendments on pH and EC in soils with low and high lime content. The solid line (—) and dashed line (---) represent the initial values in low-lime and high-lime soils, respectively.

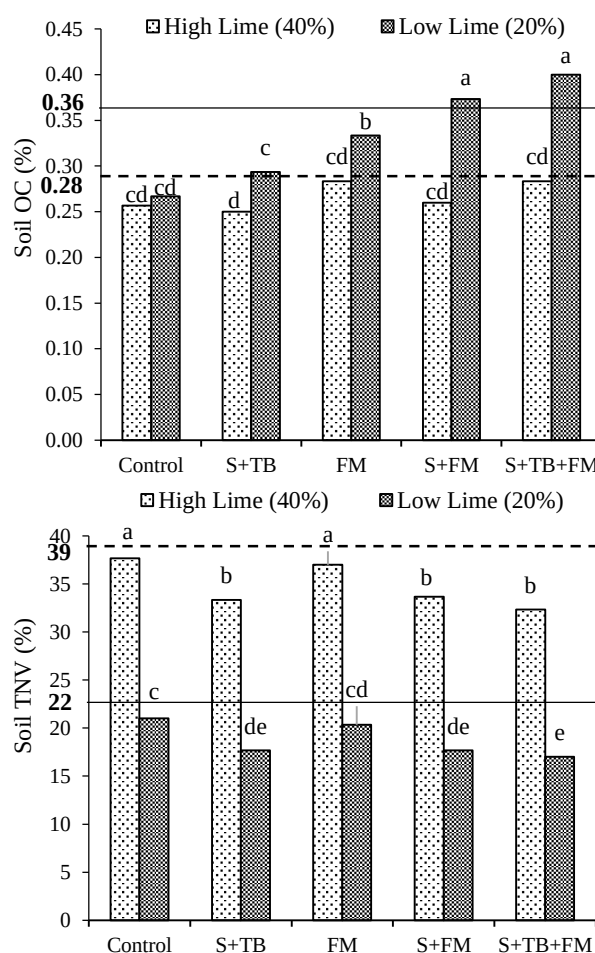
نداشت. از نظر کمی، تیمار S+TB+FM توانست درصد آهک خاک پرآهک و کم‌آهک را به ترتیب به میزان ۱۶ و ۱۹ درصد نسبت به شاهد کاهش دهد. **کربن آلی:** در بررسی کربن آلی خاک، نتایج نشان داد که در خاک پرآهک، هیچ یک از تیمارهای اعمال شده (شامل گوگرد، کود دامی و ترکیبات آنها) نتوانستند تغییر معنی‌داری در میزان کربن آلی خاک ایجاد کنند که احتمالاً ناشی از اثرات بافری کربنات‌ها و pH بالای این نوع خاک‌ها می‌باشد. در مقابل، در خاک کم‌آهک، تیمارهای ترکیبی S+FM و S+TB+FM میزان کربن آلی خاک را در مقایسه با FM، S+TB و شاهد به‌طور معنی‌دار افزایش دادند. تغییرات کربن آلی در خاک کم‌آهک به مراتب

آهک: در هر دو نوع خاک (کم‌آهک و پرآهک)، تیمارهای حاوی گوگرد (S+TB، S+TB+FM و S+FM)، محتوای آهک خاک را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌دار کاهش دادند، در حالی که کود دامی (FM) اثر معنی‌داری بر این شاخص نداشت (شکل ۲). اکسیداسیون گوگرد منجر به تولید اسید سولفوریک شده و با واکنش اسید با آهک، مقدار آهک کاهش می‌یابد؛ با این حال، کود دامی به علت مقدار کم (۴ تن در هکتار)، ظرفیت بافری زیاد خاک آهکی و ضعف مکانیسم‌های کاهش‌دهنده pH در کود دامی (مانند اسیدهای آلی ناشی از تجزیه کود دامی) نسبت به گوگرد، اثر چندانی بر کاهش میزان آهک خاک

موسوی (Karimi and Mosavi, 2023) نشان دادند که کاربرد کود دامی در غلظت یک درصد پس از ۶۰ روز موجب افزایش ۵۰ درصدی کربن آلی خاک شد؛ اما کاربرد گوگرد نتوانست تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی خاک داشته باشد.

بنابراین، کاربرد گوگرد + کود دامی (S+TB+FM) و (S+FM) در خاک با آهک زیاد با این که اثر معنی‌دار بر میزان کربن آلی خاک ندارد، اما می‌تواند میزان آهک خاک را کاهش دهد. با این حال، این تیمارها در خاک کم‌آهک ضمن کاهش میزان آهک، می‌تواند کربن آلی خاک را نیز افزایش دهد.

شدیدتر از خاک پرآهک بود که مجدداً تأییدکننده تأثیر محدودکننده مقادیر بالای آهک بر کارایی اصلاح‌کننده‌های خاک است. به‌طور کلی، خاک کم‌آهک در مقایسه با خاک پرآهک از پتانسیل بیشتری برای ذخیره کربن آلی برخوردار بود که می‌تواند ناشی از تسریع تجزیه مواد آلی در محیط قلیایی باشد. نکته قابل توجه آنکه تیمار S+TB به تنهایی تأثیر محسوسی بر افزایش کربن آلی نداشت که نشان‌دهنده نقش کلیدی کود دامی در تأمین مستقیم کربن آلی و نیز بهبود شرایط فیزیکی خاک برای ذخیره کربن است. در این رابطه، کریمی و



شکل ۲- اثر متقابل گوگرد و کود دامی بر TNV (میزان آهک) و OC (کربن آلی) دو خاک با آهک کم و زیاد. خط ممتد (—) و خط چین (---) به ترتیب مقادیر اولیه را در خاک‌های با آهک کم و آهک زیاد نشان می‌دهند.

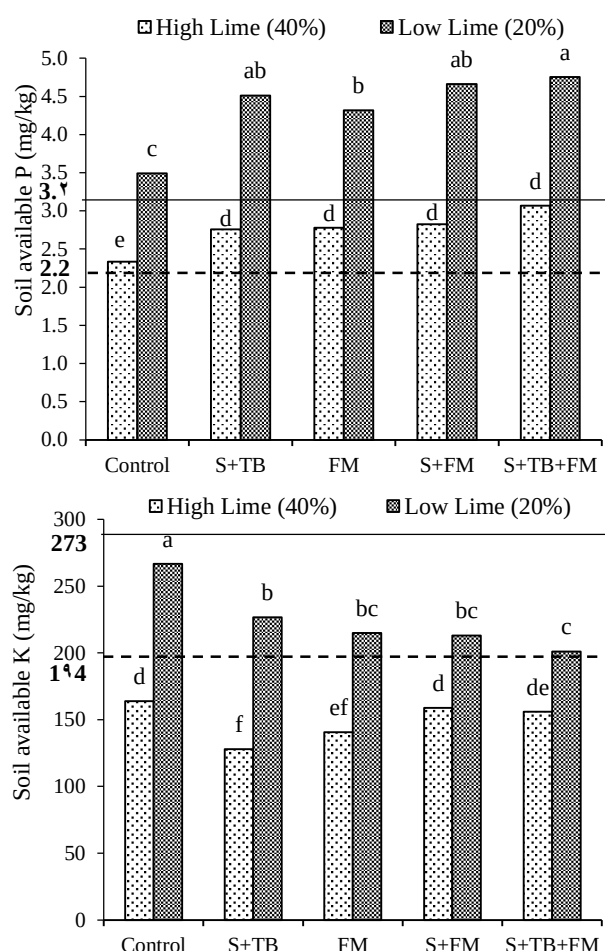
Figure 2. Interactive effect of sulfur and manure amendments on TNV and OC in soils with low and high lime content. The solid line (—) and dashed line (---) represent the initial values in low-lime and high-lime soils, respectively.

فسفر قابل جذب: اعمال تیمارهای اصلاحی اثر متفاوتی بر فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک‌های پرآهک و کم‌آهک داشت (شکل ۳). کلیه تیمارهای اصلاحی خاک شامل S+FM، S+TB+FM، S+TB و FM در هر دو نوع خاک موجب افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب نسبت به تیمار شاهد شدند و بیشترین میزان فسفر قابل جذب در هر دو نوع خاک، مربوط به تیمار ترکیبی S+TB+FM بود، در حالی که کمترین مقدار در تیمار شاهد مشاهده شد. این افزایش احتمالاً ناشی از مکانیسم‌های متعددی از جمله کاهش pH خاک بر اثر اکسیداسیون گوگرد و در نتیجه، افزایش حلالیت ترکیبات فسفات، آزادسازی فسفر از ترکیبات آلی کود دامی و همچنین فعالیت میکروبی افزایش یافته توسط باکتری تیوباسیلوس می‌باشد. بنابراین، تحت شرایط نامساعد خاک‌های آهکی، به علت وجود کربنات کلسیم و pH بالا، استفاده از کودهای شیمیایی فسفر ممکن است به حل مشکل کمبود فسفر کمک قابل توجهی نکند، درحالی که می‌توان با اقدامات اصلاحی نظیر کاربرد گوگرد همراه با کود دامی، از تثبیت زیاد فسفر افزوده شده به خاک کاسته و وضعیت تغذیه‌ای گیاه را بهبود داد. این یافته‌ها با نتایج خادم و همکاران (Khadem *et al.*, 2014) که به برهم‌کنش مثبت بین کود دامی و گوگرد در بهبود فراهمی عناصر غذایی اشاره داشتند، هم‌خوانی دارد. گزارش شده است که افزودن گوگرد به خاک می‌تواند از طریق مکانیسم‌هایی مانند جایگزینی فسفات (PO_4) با سولفات (SO_4) در محل‌های تبادلی، آزادسازی PO_4 از طریق پیوند با کلسیم و همچنین کاهش pH خاک، بر قابلیت دسترسی فسفر تأثیر بگذارد (Gunal *et al.*, 2019). مواد آلی نیز با کمپلکس کردن کلسیم و کاهش غلظت آن در محلول خاک از تشکیل فسفات کلسیم جلوگیری می‌نماید. علاوه بر آن، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تلقیح خاک‌های آهکی با باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد فرآیند اکسیداسیون گوگرد را تسریع و قابلیت دسترسی فسفر را بهبود

می‌بخشد (Salimpour *et al.*, 2010). خادم و همکاران (Khadem *et al.*, 2014) مشاهده کردند که با افزودن ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری به خاک، میزان فسفر قابل جذب خاک افزایش یافت اما با افزایش گوگرد مصرفی به ۰/۵۰ درصد، فسفر قابل جذب کاهش یافت. نوروزی و همکاران (Norouzi *et al.*, 2018) نیز گزارش کردند که مصرف گوگرد در یک خاک آهکی با کاهش pH خاک (۰/۴۹) واحد کاهش نسبت به شاهد)، میزان سولفات و فسفر قابل جذب خاک را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار افزایش داد. مقایسه پاسخ دو خاک مورد مطالعه به تیمارها نشان داد که فسفر قابل جذب خاک کم‌آهک در مقایسه با خاک پرآهک حساسیت بیشتری به اصلاح‌کننده‌ها نشان داد؛ به طوری که با اعمال تیمارهای اصلاح‌کننده در این خاک، فسفر قابل جذب نسبت به شاهد تغییرات شدیدتری را نشان داد؛ در حالی که این اختلاف برای پتاسیم قابل جذب کمتر بود. نکته جالب توجه اینکه در خاک کم‌آهک، کاربرد کود دامی به تنهایی (FM) توانست فسفر قابل جذب را افزایش دهد، اما در خاک پرآهک، کود دامی تنها زمانی مؤثر بود که به همراه گوگرد مصرف شد. این تفاوت رفتاری احتمالاً به ظرفیت بافری بیشتر خاک‌های پرآهک و شرایط متفاوت شیمیایی آن‌ها مربوط می‌شود. گزارش شده است که افزودن گوگرد به خاک‌های قلیایی می‌تواند از طریق فرآیند اکسیداسیون، قابلیت دسترسی فسفر را افزایش دهد (Fox *et al.*, 2014). **پتاسیم قابل جذب:** در مورد پتاسیم قابل جذب، الگوی تغییرات کمی پیچیده‌تر بود. در خاک پرآهک، تیمارهای S+TB و FM موجب کاهش معنی‌دار این صفت شدند، در حالی که تیمارهای S+FM و S+TB+FM اثر معنی‌داری بر آن نداشتند. در خاک کم‌آهک، تمامی تیمارهای اصلاحی منجر به کاهش معنی‌دار پتاسیم قابل جذب شدند که کمترین مقدار آن در تیمار S+TB+FM ثبت شد (شکل ۳). این کاهش ممکن است ناشی از افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه در نتیجه بهبود رشد و افزایش بیومس

از خاک، میزان عناصر موجود در خاک به مرور زمان کاهش یافت و بیشترین کاهش در قابلیت دسترسی عناصر غذایی خاک پس از زمان برداشت محصول رخ داد.

گیاه باشد. نباتی و همکاران (Nobati *et al.*, 2015) گزارش کردند که کاربرد گوگرد عنصری با کاهش ۰/۸۱ واحدی pH خاک، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک آهکی و عملکرد نخود دیم را افزایش داد. با این حال، به دلیل افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه



شکل ۳- اثر متقابل گوگرد و کود دامی بر پتاسیم و فسفر قابل جذب دو خاک با آهک کم و زیاد. خط ممتد (—) و خط چین (---) به ترتیب مقادیر اولیه را در خاک‌های با آهک کم و آهک زیاد نشان می‌دهند.

Figure 3. Interactive effect of sulfur and manure amendments on soil available K and P with low and high lime content. The solid line (—) and dashed line (---) represent the initial values in low-lime and high-lime soils, respectively.

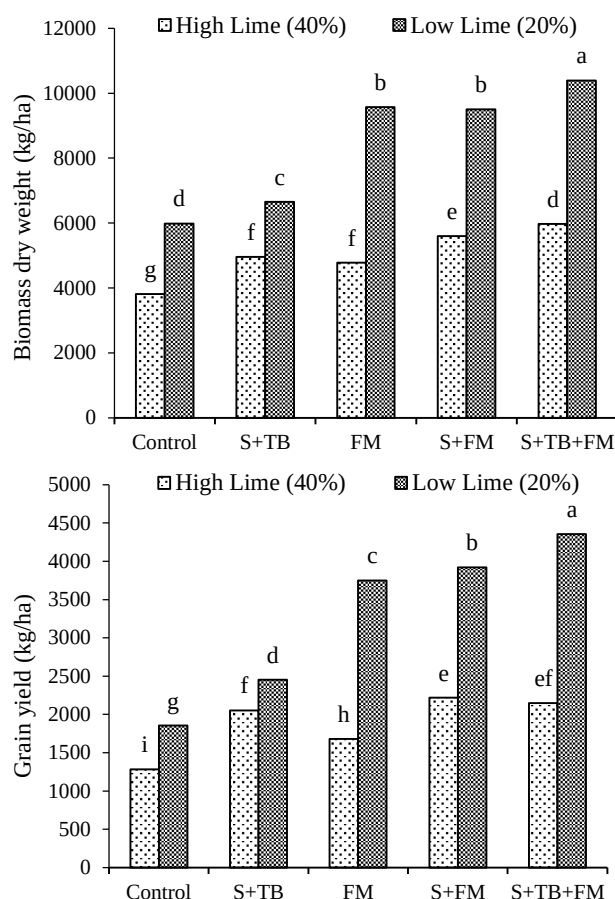
خاک پرآهک بود. تیمار ترکیبی S+TB+FM در هر دو نوع خاک بیشترین مقادیر عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک را تولید کرد، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به تیمار شاهد بود که نشان‌دهنده برهم‌کنش‌های هم‌افزای اجزای این تیمار شامل گوگرد (به عنوان عامل کاهش‌دهنده pH)، کود دامی (تأمین‌کننده مواد آلی و عناصر غذایی و بهبود شرایط

عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک: در هر دو نوع خاک مورد مطالعه، کلیه تیمارهای اصلاحی شامل S+TB، S+TB+FM، S+FM و FM عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک گندم را در مقایسه با تیمار شاهد به طور معنی‌دار افزایش دادند (شکل ۴). اگرچه این افزایش در هر دو نوع خاک مشاهده شد، اما میزان بهبود عملکرد در خاک کم‌آهک به مراتب شدیدتر از

محیط) و باکتری تیوباسیلوس (تسهیل کننده اکسیداسیون گوگرد) می باشد. در خاک کم آهک، کاربرد منفرد کود دامی (FM) نیز تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد داشت، در حالی که در خاک پرآهک، کود دامی تنها زمانی مؤثر واقع شد که به همراه گوگرد مصرف شد. این تفاوت رفتاری احتمالاً ناشی از تأثیر متقابل بین ویژگی های شیمیایی خاک (به ویژه pH و ظرفیت بافری) و تیمارهای اعمال شده می باشد؛ به طوری که در خاک های پرآهک، ظرفیت بافری بالا و pH قلیایی باعث کاهش اثربخشی تیمارهای اصلاحی می شود، در حالی که در خاک های کم آهک، حساسیت بیشتر به تغییرات شیمیایی ناشی از تیمارها منجر به پاسخ بهتر گیاه شده است. لو و همکاران (Luo et al., 2025) نقش گوگرد در سنتز آنزیم های آنتی اکسیدانی و افزایش مقاومت گیاه به تنش های محیطی را اثبات کردند. خادم و همکاران (Khadem et al., 2014) گزارش کردند که با افزایش میزان کود دامی و گوگرد مصرفی، وزن خشک گیاه ذرت افزایش یافت و به این نتیجه رسیدند که کاربرد توأم کودهای دامی و گوگرد اثر بهتری نسبت به کاربرد جداگانه این مواد دارد. نتایج متاآنالیز انجام شده توسط لو و همکاران (Lu et al., 2025) بر پایه ۱۸۱ پژوهش و ۱۱۶۲ مقایسه در چین نشان داد که مصرف کودهای گوگردی به طور میانگین موجب افزایش ۸/۲ درصدی عملکرد محصولات کشاورزی شده است و کارایی کود گوگردی تحت تأثیر عوامل محیطی مختلف نظیر ویژگی های خاک (از جمله میزان آهک و سولفات خاک)، نوع محصول، نوع کشت (آبی یا دیم) و میزان بارش قرار می گیرد. به عنوان مثال، گزارش کردند که مناطق پر بارش (بیش از ۱۰۰۰ میلی متر در سال) با ۷/۷ درصد افزایش عملکرد نسبت به مناطق کم بارش (۵/۴ درصد) نتایج بهتری نشان دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که مدیریت بهینه گوگرد براساس شرایط خاک، نوع محصول و اقلیم می تواند بدون نیاز به افزایش مصرف

کودهای NPK به طور معنی دار به افزایش تولید محصولات کشاورزی منجر شود. آسیفا و همکاران (Assefa et al., 2021) نشان دادند که کاربرد توأم فسفر به مقدار ۲۲ کیلوگرم در هکتار و گوگرد به مقدار ۱۵ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه گندم را ۴۰ درصد و عملکرد کاه را ۵۳ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد و عملکرد گندم در تیمار ترکیبی فسفر + گوگرد به طور معنی دار بیشتر از تیمارهای تک عنصری (فقط فسفر یا فقط گوگرد) بود که نشان دهنده برهم کنش های هم افزا بین این دو عنصر است.

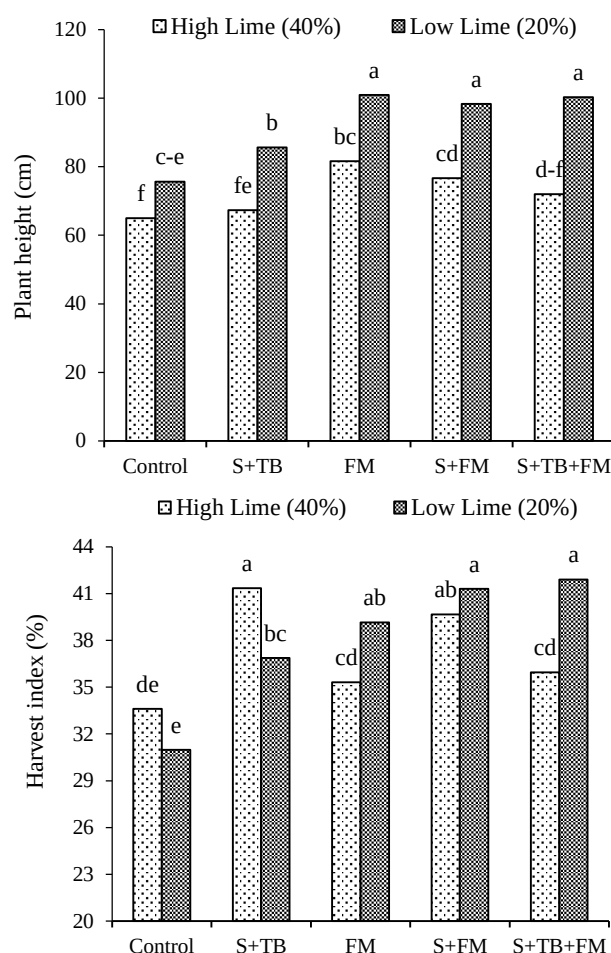
ارتفاع بوته و شاخص برداشت: تیمارهای اصلاحی تأثیرات متفاوتی بر ارتفاع بوته و شاخص برداشت گندم در خاک های کم آهک و پرآهک داشتند. در خاک پرآهک، تیمار FM و S+FM ارتفاع بوته را نسبت به شاهد به طور معنی دار افزایش داد. در خاک کم آهک، تیمارهای FM، S+FM و S+TB+FM به طور معنی دار بیشترین ارتفاع بوته را داشتند که تفاوت قابل توجهی با تیمار شاهد نشان داد. در تمامی تیمارها، ارتفاع بوته در خاک کم آهک به طور معنی دار بیشتر از خاک پرآهک بود. در خاک پرآهک تیمار S+TB بیشترین شاخص برداشت را به خود اختصاص داد، در حالی که در خاک کم آهک تیمار ترکیبی S+TB+FM بیشترین شاخص برداشت را داشت. کمترین مقادیر شاخص برداشت در هر دو نوع خاک، مربوط به تیمار شاهد بود. بررسی روابط بین پارامترها نشان داد که در خاک کم آهک، تیمارهای حاوی گوگرد و کود دامی (S+FM و S+TB+FM) بیشترین تأثیر مثبت را هم بر ارتفاع بوته و هم بر شاخص برداشت داشتند. در این خاک، کود دامی به تنهایی (FM) نیز تأثیر قابل ملاحظه ای بر ارتفاع بوته و شاخص برداشت داشت. بیشترین مقادیر ارتفاع بوته و شاخص برداشت در خاک کم آهک و به ترتیب در تیمارهای FM و S+TB+FM ثبت شد.



شکل ۴- اثر متقابل گوگرد و کود دامی بر عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم دو خاک با آهک کم و زیاد.
Figure 4. Interactive effect of sulfur and manure amendments on grain yield and biological yield of wheat with low and high lime content.

رشد گیاه و عملکرد محصول بسیار مؤثر است، در حالی که در خاک پرآهک نیاز به ترکیب با گوگرد دارد. افزایش ارتفاع ناشی از کاربرد کود دامی (پوسیده) و گوگرد ممکن است به علت افزایش نیتروژن خاک باشد. به عنوان مثال، احمد (Ahmed, 2008) نشان داد که کاربرد کود دامی و گوگرد عنصری باعث بهبود معنی دار عناصر غذایی قابل دسترس خاک (از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس و روی) شد که با افزایش میزان مصرف این مواد، غلظت این عناصر در خاک به طور قابل توجهی افزایش یافت. حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2017) اثر گوگرد و کود دامی را بر رشد و عملکرد ذرت در یک خاک آهکی مورد مطالعه قرار داده و گزارش کردند که کاربرد گوگرد و کود دامی عملکرد و ارتفاع گیاه را افزایش داد.

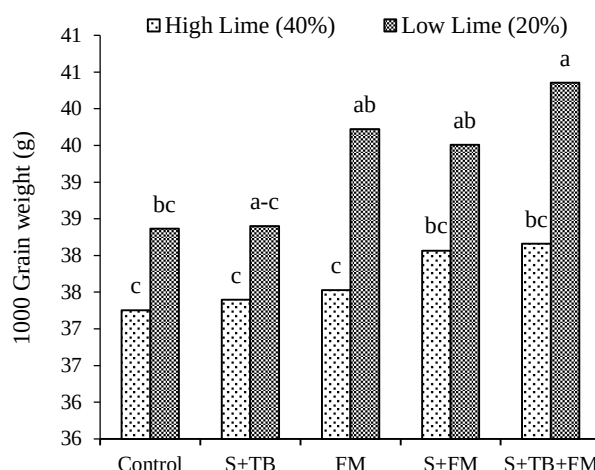
همچنین مشاهده شد که در خاک کم آهک، تیمارهایی که منجر به افزایش ارتفاع بوته شدند (FM، S+FM و S+TB+FM)، شاخص برداشت بیشتری نیز داشتند که نشان دهنده همبستگی مثبت بین این دو صفت در خاک کم آهک می باشد. این یافته ها نشان می دهد که در خاک کم آهک، استفاده از ترکیب گوگرد و کود دامی می تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود همزمان رشد رویشی (ارتفاع بوته) و عملکرد اقتصادی (شاخص برداشت) گندم مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، در خاک کم آهک، ترکیب گوگرد و کود دامی (به ویژه S+TB+FM) هم رشد رویشی و هم کارایی تولید دانه (شاخص برداشت) را به طور همزمان بهبود بخشد. کود دامی در خاک کم آهک به تنهایی برای بهبود



شکل ۵- اثر متقابل گوگرد و کود دامی بر ارتفاع بوته و شاخص برداشت گندم دو خاک با آهک کم و زیاد.
Figure 5. Interactive effect of sulfur and manure amendments on plant height and harvest index with low and high lime content.

این صفت نداشتند. این نتایج نشان می‌دهد که اثر اصلاح کننده‌های خاک بر وزن هزاردانه گندم به میزان آهک خاک بستگی داشته و در خاک‌های با آهک کمتر، کاربرد ترکیبی گوگرد و کود دامی می‌تواند به بهبود معنی‌دار این صفت منجر شود. بنابراین، در مدیریت تغذیه گندم، توجه به درصد آهک خاک برای انتخاب مناسب‌ترین تیمار اصلاح‌کننده ضروری به نظر می‌رسد.

وزن هزاردانه: در خاک پرآهک، تیمارهای مختلف اثر معنی‌داری بر وزن هزاردانه نداشتند (شکل ۶). با این حال، در خاک کم‌آهک، تیمارهای حاوی کود دامی (FM) و ترکیب گوگرد و کود دامی (S+FM) و به‌طور معنی‌داری وزن هزاردانه را افزایش دادند، به‌طوری که بیشترین وزن هزاردانه (۴۰/۴ گرم) در تیمار ترکیبی گوگرد، تیوباسیلوس و کود دامی (S+TB+FM) مشاهده شد؛ درحالی که در خاک با آهک بالا، این تیمارها اثر قابل‌توجهی بر



شکل ۶- اثر متقابل گوگرد و کود دامی بر وزن هزاردانه گندم دو خاک با آهک کم و زیاد.

Figure 6. Interactive effect of sulfur and manure amendments on 1000 grain weight with low and high lime content.

نیاز به مدیریت ویژه دارد. همچنین، نتایج نشان داد اگرچه خاک کم آهک پتانسیل پاسخ‌دهی بیشتری به اصلاح‌کننده‌ها (گوگرد و کود دامی) داشت، اما در خاک پرآهک نیز با انتخاب ترکیب مناسب تیمارها می‌توان به بهبود شرایط تغذیه‌ای دست یافت. بنابراین، انتخاب تیمارهای اصلاحی باید بر اساس نوع خاک (میزان آهک) و اهداف مدیریتی انجام شود. چرا که خاک‌های کم آهک پتانسیل بیشتری برای پاسخ به اصلاح‌کننده‌ها دارند، در حالی که خاک‌های پرآهک نیاز به راهکارهای ویژه و احتمالاً مقادیر بیشتر نهاده‌ها دارند.

با توجه به این یافته‌ها، می‌توان توصیه‌های کاربردی زیر را ارائه نمود: در خاک‌های کم آهک، تیمار ترکیبی S+TB+FM به عنوان راهکار بهینه برای دستیابی به حداکثر عملکرد گندم پیشنهاد می‌شود، چرا که این تیمار همزمان موجب بهبود خصوصیات شیمیایی خاک و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌شود. در مقابل، برای خاک‌های پرآهک، اگرچه تیمارهای اصلاحی قادر به بهبود عملکرد هستند، اما به دلیل محدودیت‌های ناشی از ویژگی‌های این خاک‌ها، نیاز به مدیریت دقیق‌تر و احتمالاً اعمال مقادیر بیشتر نهاده‌ها وجود دارد.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد تیمارهای اصلاحی مبتنی بر گوگرد و کود دامی تأثیرات متفاوتی بر خصوصیات شیمیایی خاک و عملکرد گندم در خاک کم آهک و پرآهک داشت. در خاک کم آهک، ترکیب گوگرد، کود دامی و باکتری تیوباسیلوس (S+TB+FM) به عنوان مؤثرترین تیمار شناخته شد. هم‌افزایی بین اجزای تشکیل‌دهنده این تیمار ترکیبی (گوگرد به عنوان عامل اسیدی‌کننده، کود دامی به عنوان بهبوددهنده شرایط محیط و باکتری تیوباسیلوس به عنوان تسهیل‌کننده اکسیداسیون) بیشترین کارایی را در بهبود حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول نشان داد. این تیمار از طریق مکانیسم‌های: (۱) کاهش معنی‌دار pH درصد آهک و (۲) افزایش محتوای کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک، توانست شاخص‌های رشدی و عملکردی گندم شامل ارتفاع بوته، شاخص برداشت، عملکرد زیستی و عملکرد دانه را بهبود دهد. در مقابل، در خاک پرآهک اگرچه تیمارهای اصلاحی موجب بهبود برخی از شاخص‌ها شدند، اما به دلیل ظرفیت بافری بالا و pH قلیایی، اثرات آنها محدود بود که

منابع

- Ahmed A. 2008. Combined effects of farmyard manure (FYM) and elemental sulfur (S) on soil chemical properties, growth, yield, leaf water and nutrient contents of corn plant grown on sandy clay loam soil. *Alexandria Science Exchange journal* 29: 175–185
- Akhavan Z, Fallah Nosrat Abad AR. 2013. The effect of sulfur and *Thiobacillus* inoculant on soil pH, dry matter weight and phosphorus absorption by Canola. *Journal of Soil Management and Sustainable* 3: 1-14 (In Persian)
- Assefa S, Haile W, Tena W. 2021. Effects of phosphorus and sulfur on yield and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.) on Vertisols, North Central, Ethiopia. *Heliyon* 7(3): e06614
- 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 (In Persian)
- Besharati H, Motalebifard R. 2016. Evaluation of the effect of sulfur application and *Thiobacillus* on some soil chemical characteristics and yield of canola in wheat-canola rotation system. *Water and Soil* 29(6): 1688-1698 (In Persian)
- Campbell CR, Plank CO. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. p. 37-50, In: Y.P. Kalra (ed.) *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press, Taylor & Francis Group
- Dane JH, Topp CG. 2020. *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. John Wiley & Sons
- Fox A, Kwapinski W, Griffiths BS, Schmalenberger A. 2014. The role of sulfur- and phosphorus-mobilizing bacteria in biochar-induced growth promotion of *Lolium perenne*. *FEMS microbiology ecology* 90, 78–91
- Ghaderi J, Malakouti MJ, Khavazi K, Davoodi MH. 2018. Sulfur oxidation under different moisture conditions and its effect on some chemical soil characteristics. *Journal of Soil Biology* 6(2): 25-36. SID (In Persian)
- Gunal S, Hardman R, Kopriva S, Mueller JW. 2019. Sulfation pathways from red to green. *Journal of Biological Chemistry* 294: 12293–12312
- Hosseini HM, Fathi Gerdelidani A, Jabalameli M. 2017. Effects of elemental and bentonite sulfur on sulfur and phosphorus availability in calcareous soil and corn growth characteristics. *Iranian Journal of Soil Research* 31(1): 61-73 (In Persian)
- Jalili F, Nasrolah Zadeh Asl A, Valiloo R. 2013. Effects of sulfur and manure fertilizer on yield and protein of wheat (var. Zarin). *Journal of Research in Crop Science* 5: 71-84 (In Persian)
- Karimi F, Bahmanyar MA, 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)
- Karimi E, Mosavi SB. 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 (In Persian)
- Khadem A, Golchin A, Zaree E. 2014. Effects of manure and sulfur on nutrients uptake by corn (*Zea mays* L.). *Applied Field Crops Research* 27(103): 2-11 (In Persian)
- Khavazi K, Jahandideh mahjan abadi VA, 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)
- Kumar M, Zeyad MT, Choudhary P, Paul S, Chakdar H, Vikram M, Rajawat S. 2020. *Thiobacillus*. Pp: 454-557. In: Amaresan N, Senthil Kumar M, Annapurna K, Kumar K, Sankaranarayanan A (eds). *Beneficial Microbes in Agro-Ecology*, Academic Press

- Lu Z, Zhang S, Li G, Ge Y, Haim PG, Mey-Tal S, Huang C. 2025. Sulfur fertilization contribute to China's food security: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy* 164: 127510
- Luo H, Zhang C, Zhang S, Song W, Chen H. 2025. Influence of sulfur and selenium application on wheat growth in arsenic-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 290: 117543
- Momen A, Pazoki A, Momayezi MR. 2011. Effects of granular sulfur (bentonitic) and compost on quantitative and qualitative characteristics of Bam wheat in Semnan region. *Crop Physiology Journal* 3(9): 31-46 (In Persian)
- Nabati J, Yousefi A, Hasanfard A, Nemati Z, Kahrom N, Malakshahi Kurdestani A. 2025. Enhancing chickpea yield through the application of sulfur and sulfur-oxidizing bacteria. *Scientific Reports* 15(1): 1169
- Najafi SH, 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 (In Persian)
- Norouzi S, Sohrabi A, Khavazi K, Matinfar HR. 2018. Effect of sulfur application on soil pH and phosphorus availability for wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Biology* 6(1): 29-41 (In Persian)
- Orman S. 2012. Effects of elemental Sulphur and farmyard manure applications to calcareous saline clay loam soil on growth and some nutrient concentrations of tomato plants. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 10: 720-725
- Salimpour SI, Khavazi K, Nadian H, Besharati H, Miransari M. 2010. Enhancing phosphorus availability to canola (*Brassica napus* L.) using P solubilizing and sulfur-oxidizing bacteria. *Australian Journal of Crop Science* 4(5): 330-334
- Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH. 2020. *Methods of Soil Analysis*, part 3: Chemical Methods (Vol. 14). John Wiley & Sons
- Stamford NP, Figueiredo MVB, da Silva Junior S, Freitas ADS, Santos CERS, Junior MAL. 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
- Zhou Y, Wang D, Zhu J, Liu Q, Fan MX. 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



Evaluation of sulfur and manure efficiency in mitigating calcareous soil constraints and improving rainfed wheat yield

Yaser Azimzadeh^{1*}, Arash Mohammadzadeh¹, Mehdi Kooselou¹, Alireza Javidan²

1- Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran.

2- East Azarbaijan Agriculture-Jahad Organization, Tabriz, Iran.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Plant growth and development in calcareous soils and within calcareous soil patches face numerous constraints. Sulfur, as an essential nutrient element, in addition to its nutritional role, exerts positive effects on the properties of calcareous soils through pH reduction. Consequently, it is utilized as one of the most important acidifying agents for ameliorating calcareous soils and improving plant nutrition. This research was conducted to investigate the effects of mineral sulfur and sulfur-oxidizing bacteria (*Thiobacillus* with a population of more than 107 cells per gram) in combination with rotten farmyard manure on the properties of two types of calcareous soils and the performance of rainfed wheat.

Methodology: The experiment was conducted as a split-plot arrangement within a randomized complete block design (RCBD) in a dryland field in Hashtroud County during the 2023–2024 growing season. The treatments consisted of two soil types (low-lime soil (22%) and high-lime soil (39%)) as the main factor, and five soil amendments as the sub-factor: sulfur + *Thiobacillus* (S+TB), sulfur + *Thiobacillus* + farmyard manure (S+TB+FM), sulfur + farmyard manure (S+FM), farmyard manure alone (FM), and a control (C). Farmyard manure was applied at 4 t ha⁻¹, sulfur at 1 t ha⁻¹, and *Thiobacillus* bacteria at 2% of the sulfur weight. Growth parameters, including plant height, 1000-grain weight, biological yield, and grain yield were measured. Additionally, soil chemical properties (pH, electrical conductivity (EC), calcium carbonate content, organic carbon, and available phosphorus and potassium) were analyzed at a depth of 0–25 cm.

Research findings: All soil amendment treatments significantly enhanced both grain and biological yields of wheat in both soil types. In the low-lime soil, the combined S+TB+FM treatment (sulfur + *Thiobacillus* + farmyard manure) proved to be the most effective, demonstrating significant reductions in lime content (from 21% to 17%) and soil pH (from 7.6 to 7.2), along with significant increases in organic carbon (from 0.27% to 0.40%) and available phosphorus (from 3.5 to 4.8 mg kg⁻¹). These modifications resulted in significant improvements in wheat growth parameters, including increased plant height (from 76 to 100 cm), grain yield (from 1854 to 4355 kg ha⁻¹, representing a 135% increase), biological yield (from 5984 to 10393 kg ha⁻¹), and harvest index (from 31% to 42%). While sulfur-containing treatments were effective in both soil types, the effect of farmyard manure was more pronounced in low-lime soil compared to high-lime soil. Based on these findings, the combined S+TB+FM treatment (comprising 1 ton sulfur, 4 tons farmyard manure, and 2% *Thiobacillus* bacteria) is recommended as the optimal soil amendment strategy for improving wheat yield in low-lime soils.

Keywords: *Thiobacillus*, calcareous soil, elemental sulfur, rainfed wheat, organic matter

* Corresponding author: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

Submit date: 2025/04/26 Accept date: 2025/09/14

