

## تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسیداسیون گوگرد و برخی از خصوصیات شیمیایی خاک

جلال قادری<sup>1</sup>، محمد جعفر ملکوتی، کاظم خاوازی و محمد حسین داوودی

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، تهران، ایران؛ [ghaderij@yahoo.com](mailto:ghaderij@yahoo.com)

استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران؛ [mjmalakouti@modares.ac.ir](mailto:mjmalakouti@modares.ac.ir)

استاد موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران؛ [kkhavazi@yahoo.com](mailto:kkhavazi@yahoo.com)

استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران؛ [davoodi\\_mh@yahoo.com](mailto:davoodi_mh@yahoo.com)

دریافت: 96/6/22 و پذیرش: 96/12/22

### چکیده

در خاک‌های آهکی از گوگرد برای کاهش pH خاک و افزایش حلالیت عناصر غذایی استفاده می‌شود که تأثیر آن به اکسیداسیون گوگرد و عوامل مؤثر بر آن (مانند رطوبت خاک) بستگی دارد. در این پژوهش تأثیر دو رژیم رطوبتی (40 و 60 درصد رطوبت اشباع) و چهار سطح گوگرد (0، 500، 1000 و 10000 کیلوگرم بر هکتار)، در سه تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بر دو سری خرقانی و خالدار، به مدت یک سال، در درجه حرارت ثابت 25 درجه سانتی‌گراد و در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب بررسی شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با کاربرد گوگرد در شرایط مختلف رطوبتی pH کاهش، هدایت الکتریکی، فسفر، آهن و روی قابل استفاده، سولفات محلول خاک افزایش و بین تأثیر تیمارهای مختلف روی صفات اندازه‌گیری شده، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) مشاهده شد. بیش‌ترین مقدار کاهش pH افزایش هدایت الکتریکی، آهن و روی قابل استفاده و سولفات محلول خاک با کاربرد 10000 کیلوگرم گوگرد بر هکتار بود که اختلاف pH هدایت الکتریکی و سولفات محلول خاک نسبت به تیمار شاهد به ترتیب در خاک خرقانی 0/38 واحد، 1/72 دسی‌زیمنس بر متر، 2588 میلی‌گرم بر کیلوگرم و در 60 روز، در خاک خالدار 2/1 واحد، 3/2 دسی‌زیمنس بر متر، 4984 میلی‌گرم بر کیلوگرم و در 360 روز آنکوباسیون و در شرایط رطوبتی 40 درصد رطوبت اشباع بود. در سری خالدار مقدار آهن و روی قابل استفاده نسبت به تیمار شاهد به ترتیب 3/53 و 0/87 میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. در سری خرقانی و خالدار، بیش‌ترین مقدار فسفر قابل استفاده با کاربرد 1000 کیلوگرم گوگرد بر هکتار مشاهده شد که اختلاف آن نسبت به تیمار شاهد به ترتیب 0/5 و 4/1 میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. با افزایش مقدار گوگرد مصرفی و زمان آنکوباسیون، مقدار اکسیداسیون گوگرد کاهش و بیش‌ترین مقدار آن با کاربرد 500 کیلوگرم گوگرد بر هکتار بود. با توجه به نتایج به دست آمده کاربرد گوگرد تا 1000 کیلوگرم بر هکتار پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: pH، سولفات، فسفر، هدایت الکتریکی.

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: کرمانشاه - میدان سپاه پاسداران، بلوار کشاورز، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

## مقدمه

در خاک‌های آهکی، علی‌رغم وجود مقادیر فراوان برخی از عناصر غذایی، فرم محلول و قابل جذب این عناصر کم‌تر از مقدار لازم، برای رشد و نمو مناسب گیاه بوده و کمبود عناصر غذایی یکی از عوامل محدود کننده تولید محصول در این خاک‌ها محسوب می‌شود (مک کری و رایس، 2013). از مهم‌ترین راهکارهای ارائه شده برای پایین آوردن pH موضعی، اصلاح خاک، افزایش حلالیت و رفع کمبود عناصر غذایی در خاک‌های آهکی و قلیایی، استفاده از کودهای اسید زا مانند گوگرد عنصری است که سالانه بیش از دو میلیون تن آن در صنایع نفت و گاز ایران تولید می‌شود و با بهای نسبتاً ارزان قابل دسترس است (ملکوتی و همکاران، 1387؛ بشارتی و همکاران، 1395). اثربخشی گوگرد عنصری بستگی به مقدار اکسیداسیون آن دارد که فرآیندی شیمیایی و زیستی است. اکسیداسیون گوگرد در خاک‌های آهکی تحت تأثیر عوامل متعددی مانند اندازه گوگرد، رطوبت خاک، درجه حرارت، pH، مقدار عناصر غذایی، فعالیت‌های میکروبی و جمعیت ریزجانداران در خاک قرار می‌گیرد (جانزن و بتانی، 1987؛ جاجی و همکاران، 2005).

اکسیداسیون زیستی گوگرد، سبب تولید اسید سولفوریک می‌شود که باعث کاهش pH خاک و حل شدن کربنات کلسیم و ایجاد شرایط مناسب برای افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی توسط گیاهان، رشد و عملکرد آن‌ها می‌شود (لیندرمن، 1991؛ عبدو، 2006؛ الترابیلی و همکاران، 2006). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر اکسیداسیون گوگرد، رطوبت خاک است (جانزن و بتانی، 1987؛ واتکینسون و بلایر، 1993). وایت رایت و همکاران (1986) گزارش کردند که مناسب‌ترین شرایط رطوبتی برای اکسیداسیون گوگرد، ظرفیت زراعی است. کاپلان و اورمان (1998) گزارش کردند با مصرف گوگرد عنصری، در شرایط مزرعه‌ای بیش‌ترین کاهش pH خاک در 10 هفتگی و در شرایط گلخانه‌ای در 5 هفتگی است و بعد از آن مجدداً افزایش می‌یابد که این ناشی از ظرفیت بافیری خاک است. جاجی و همکاران (1999) اثر شرایط مختلف حرارتی را بر معدنی شدن گوگرد آلی خاک و اکسیداسیون گوگرد را در خاک‌هایی با pH های مختلف بررسی و گزارش کردند که بیش‌ترین مقدار اکسیداسیون گوگرد در خاک‌های اسیدی، خنثی و قلیایی شمال غرب هند، در 60 درصد رطوبت اشباع نسبی و 36 درجه سانتی گراد بود. گزارش شده است که مقدار رطوبت خاک صرف‌نظر از pH خاک در 60 درصد رطوبت اشباع و در 24 روز آنکوباسیون، اثری زیادی روی فرآیندهای معدنی

شدن گوگرد آلی بومی خاک، اکسیداسیون و تبدیل گوگرد به گوگرد آلی دارد و بیش‌ترین مقدار اکسیداسیون گوگرد در 60 درصد رطوبت اشباع و در 14 روز اولیه آنکوباسیون بود (اولاک و همکاران، 2002). جاجی و همکاران (2005)، تأثیر کاربرد گوگرد عنصری را در سه رژیم رطوبتی مختلف (40، 60 و 120 درصد) و سه رژیم دمایی متفاوت (12، 24 و 36 درجه سانتی‌گراد) بر تغییرات pH و قابلیت دسترسی فسفر در سه نوع خاک، اسیدی، خنثی و قلیایی بررسی و گزارش کردند که اکسیداسیون گوگرد، باعث کاهش pH خاک قلیایی و افزایش غلظت فسفر قابل دسترس شد و بیش‌ترین مقدار آن در شرایط رطوبتی 60 درصد بدست آمد. هاشمی مجد و همکاران (2012) گزارش کردند که با کاربرد گوگرد در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی، بیش‌ترین مقدار کاهش pH خاک در 28 روز آنکوباسیون بود و سپس به علت خاصیت بافیری خاک، مجدداً افزایش یافت.

همانطوری که اشاره شد اثربخشی گوگرد بستگی به اکسید شدن آن به اسید سولفوریک دارد و آگاهی از چگونگی اکسیداسیون آن در خاک‌های آهکی و عوامل مؤثر بر آن، می‌تواند اولین گام برای بکارگیری این ماده در زمینه اصلاح خاک، کاهش pH و تغذیه گیاهی باشد (بشارتی، 1395). با توجه به وجود تحقیقات کم (ناچین) در باره تأثیر شرایط رطوبتی مختلف بر اکسیداسیون گوگرد در کشور ما و با عنایت به اینکه گوگرد گرانوله با فرآیند خاصی توسط پژوهشگاه صنعت نفت تولید و بلافاصله با جذب رطوبت باز شده و مشکلات مربوط به کودهای گوگرد گرانوله ای قبلی را ندارد، این تحقیق به همین منظور برای بررسی تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسیداسیون گوگرد و برخی از خصوصیات شیمیایی دو سری خاک با خصوصیات متفاوت به مدت یک سال، در درجه حرارت ثابت 25 سانتی‌گراد و در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب انجام شد.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش تأثیر دو شرایط رطوبتی (40 و 60 درصد رطوبت اشباع) و چهار سطح گوگرد (صفر، 500، 1000 و 10000 کیلوگرم بر هکتار) از منبع گوگرد تولیدی پژوهشگاه صنعت نفت به همراه باکتری تیوباسیلوس، در سه تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بر دو سری خاک (خرقانی و خالدار) با خصوصیات متفاوت به مدت یک سال و در درجه حرارت ثابت 25 درجه سانتی‌گراد در اتاقک آنکوباتور آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب بررسی شد. گوگرد پاستیل، یک نوع کود گوگردی گرانوله به رنگ

رطوبت به‌وسیله روش وزنی و در فواصل 48 الی 72 ساعت انجام شد. در پایان هر دوره نگهداری شده، خاک‌ها را از ظرف‌ها برداشته، خوب مخلوط شده و برای تجزیه‌های مختلف استفاده شد. pH و هدایت الکتریکی خاک در نسبت خاک به آب 1:2.5 (W/V)، در زمان‌های صفر، 3، 7، 15، 25، 40، 60، 120، 180، 270 و 360 روز، غلظت فسفر، آهن و روی قابل استفاده در زمان‌های صفر، 40، 80، 120 و 360 روز با روش‌های متداول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند (علی‌احیایی و بهبهانی زاده، 1372). غلظت سولفات قابل استفاده در زمان‌های صفر، 25، 60 و 360 روز به‌وسیله روش توریدومتری (چسین و یان، 1951) و میزان اکسیداسیون گوگرد، در زمان‌های 25، 60 و 360 روز بوسیله معادله جانزن و بتانی (1987) محاسبه شد.

$$K = (1 - (1 - m/m_0)^{1/3})z Do/2t$$

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

m: جرم (میکروگرم) گوگرد اکسید شده (از طریق افزایش غلظت گوگرد قابل عصاره‌گیری با 0/15 درصد کلرور کلسیم در خاک تیمار شده نسبت به تیمار نشده در همان زمان محاسبه شد).

m<sub>0</sub>: جرم گوگرد (میکروگرم) در زمان اولیه هر دوره نگهداری در آنکوباتور.

Z: دانسته گوگرد (2.07 × 10<sup>6</sup> μg Cm<sup>-3</sup>). t: زمان نگهداری در آنکوباتور (روز).

Do: قطر ذرات گوگرد در شروع هر دوره نگهداری در آنکوباتور (0/075 سانتی‌متر در نظر گرفته شد).

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

### نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک‌های مورد آزمایش در جدول یک نشان داده شده است.

سبز متمایل به زرد می‌باشد که دارای 12 درصد رس بتونیت و 88 درصد گوگرد است.

قبل از شروع آزمایش نسبت به تجزیه خصوصیات شیمیایی و فیزیکی (بافت و درصد رطوبت اشباع) خاک‌های مورد آزمایش اقدام که نتایج آن‌ها در جدول یک نشان داده شده است. نمونه خاک خالدار از استان لرستان با مشخصات جغرافیایی 48 درجه، 20 دقیقه و 36 ثانیه طول شرقی و 33 درجه، 32 دقیقه و 23 ثانیه عرض شمالی که بر اساس مطالعات خاکشناسی نیمه تفصیلی جزو فامیل Fine Mixed Mesic و تحت گروه Typic Xerochrepts (کشمیری، 1362) و نمونه خاک خرقانی از استان سمنان با مشخصات جغرافیایی 55 درجه، 4 دقیقه و 18 ثانیه طول شرقی و 36 درجه، 35 دقیقه و 48 ثانیه عرض شمالی که جزو فامیل Fine Carbonatic Mesic و تحت گروه Typic Haplocambids (ناصری، 1371) بودند، نمونه برداری و آماده ساری شدند. سپس مقدار 800 گرم خاک هوا خشک در داخل ظرف‌های پلاستیکی 1500 میلی‌لیتری ریخته شد. سپس نسبت به اعمال تیمار-های کودی همراه با باکتری تیوباسیلوس اقدام شد.

در این آزمایش به ازای هر 50 کیلوگرم کود گوگرد مصرفی، یک کیلوگرم باکتری تیوباسیلوس از گونه T. neapolitanous استفاده شد. مقادیر گوگرد مصرفی با فرض وزن یک هکتار، سه میلیون کیلوگرم و مقدار 10 تن ورمی‌کمپوست بر هکتار محاسبه و به‌طور یکنواخت در تمام تیمارها مصرف شد. مقدار آب اضافه شده به نمونه‌های خاک برای 800 گرم خاک خشک برای رسیدن به 40 و 60 درصد رطوبت اشباع در سری خرقانی به ترتیب 157 و 235 میلی‌لیتر و در سری خالدار 173 و 260 میلی‌لیتر بود. مقدار کود ورمی‌کمپوست مصرفی برای 800 گرم خاک، 2/7 گرم بود. با استفاده از پیت فاین جت، آب مقطر به نمونه‌های خاک اضافه تا به رطوبت مورد نظر بر-اساس تیمارهای رطوبتی 40 و 60 درصد رطوبت اشباع برسد. درب هر ظرف با استفاده از پارافیلیم بسته شد (جهت جلوگیری از تبخیر). روی درب قوطی‌ها چند سوراخ برای انجام تهویه مناسب تعبیه شد. سپس ظرف‌ها در دمای مورد نظر در آنکوباتور نگهداری شدند. کنترل

جدول 1- نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

سری	درصد رطوبت اشباع	pH 1:2.5	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی اکی والان در 100 گرم خاک)	کربنات کلسیم کل (درصد)	فسفر	آهن	روی	گوگرد	بافت خاک
خرقانی	36	7/71	3/2	0/77	15/2	63	10/6	10/7	0/5	511	رسی سیلتی
خالدار	54	7/5	0/21	0/98	38/4	1/2	9/6	6	0/3	4	رسی

\* همه عناصر غذایی در جدول به فرم قابل جذب می‌باشد.

مقادیر اندازه‌گیری شده pH، قابلیت هدایت الکتریکی، فسفر، آهن و روی قابل‌استفاده و سولفات خاک به عنوان نمایه‌هایی از اکسیداسیون گوگرد در خاک، در سطوح مختلف گوگرد کاربردی در شرایط مختلف رطوبتی پس از طی دوره آنکوباسیون تیمارهای آزمایشی در جدول‌های مختلف نشان داده شده است. در این پژوهش مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی، فسفر، آهن و روی قابل‌استفاده و سولفات خاک‌ها با افزایش سطح گوگرد کاربردی در شرایط رطوبتی مختلف بعد از سپری شدن دوره آنکوباسیون در خاک‌های مورد آزمایش افزایش و pH کاهش داشت که بیانگر فرآیند اکسیداسیون گوگرد است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در دو سری خاک خالدار و خرقانی، بین تأثیر تیمارهای مختلف کاربرد گوگرد همراه با باکتری تیوباسیلوس در شرایط رطوبتی مختلف بر pH، قابلیت هدایت الکتریکی، فسفر، آهن و روی قابل‌استفاده، سولفات خاک و مقدار اکسیداسیون گوگرد اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت (جدول 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9، 10 و 11).

#### pH خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش سطوح گوگرد مصرفی و در شرایط 40 و 60 درصد رطوبت اشباع، pH خاک در دو سری خاک خرقانی و خالدار کاهش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر pH خاک اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت (جدول 2 و 3). بیش‌ترین مقدار کاهش pH خاک در سری خرقانی با کاربرد 10000 کیلوگرم گوگرد در هکتار به مقدار 0/38 واحد (از 7/71 به 7/33) و در 60 روز آنکوباسیون و در شرایط 40 درصد رطوبت اشباع بود (جدول 2). با افزایش زمان آنکوباسیون (بیش‌تر از 60 روز)، مجدداً pH خاک به علت کاهش مقدار اکسیداسیون گوگرد روند افزایشی و شروع به بازگشت به حالت اولیه داشت که ناشی از وجود ظرفیت بافری و مقدار کربنات کلسیم بالای خاک (دارای 63 درصد آهک کل) است. کاهش pH در تمام سطوح گوگرد مصرفی نسبت به شاهد بیانگر کافی بودن اسید تولید شده در اثر اکسایش گوگرد می‌باشد به عبارت دیگر در حضور باکتری‌های تیوبا-سیلوس، گوگرد در خاک اکسید شده و با تولید اسید سولفوریک باعث کاهش pH خاک می‌شود. نتایج این

تحقیق با نتایج تیسدل و نلسون (1958)، کلباسی و همکاران (1988)، نیلسون و همکاران (1993) و کاپلان و اورمان (1998)، اورمان و هوسین (2012) و هاشمی مجد و همکاران (2012) مطابقت داشت. در خاک خالدار نیز بیش‌ترین مقدار کاهش pH خاک با کاربرد 10000 کیلوگرم گوگرد در هکتار در شرایط 40 درصد رطوبت اشباع به مقدار 2/1 واحد (از 7/50 به 5/41) و در 360 روز آنکوباسیون بود (جدول 3). در سری خاک خالدار مقدار درصد کربنات کلسیم 1/2 درصد بود که بیانگر پایین بودن ظرفیت بافری خاک است. در نتیجه مشاهده شد که نسبت به خاک سری خرقانی (دارای درصد کربنات کلسیم و سولفات قابل جذب بیش‌تر)، pH خاک با افزایش زمان آنکوباسیون، بیش‌تر کاهش یافت. برخی محققین دیگر به این نتیجه رسیدند که با افزودن گوگرد، pH خاک کاهش می‌یابد و این کاهش وقتی که مقدار آهک خاک کم است، می‌تواند بیش‌تر باشد (مه‌دیش و همکاران، 1989) که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد و در مورد خاک سری خالدار در مقایسه با خاک خرقانی صدق می‌کند.

کاهش کم pH خاک در سری خرقانی با کاربرد گوگرد می‌تواند، ناشی از یکی از دلایل زیر باشد (فلاته، 1998).

1- ظرفیت بافری زیاد (در نتیجه مقدار کربنات کلسیم زیاد و ماده آلی کم).

خاصیت بافری خاک به وجود رس، مواد آلی، آهک، ترکیبات فسفات و بسیاری از ترکیبات شیمیایی دیگر بر می‌گردد. هرگاه مقدار اسید تولید شده در اثر اکسیداسیون گوگرد، توان خنثی کردن عوامل بافر را دارا باشد، pH خاک کاهش می‌یابد (بشارتی و همکاران، 1395).

2- اکسیداسیون ناقص گوگرد به اسید سولفوریک در این تحقیق مشخص شد که با افزایش درصد رطوبت بیش‌تر از 40 درصد (تقریباً معادل شرایط ظرفیت زراعی)، به علت محدودیت تهویه (کمی اکسیژن در خاک) و کاهش فعالیت ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد، مقدار کاهش pH خاک کم‌تر بود که نتایج اندازه‌گیری در مورد تغییرات pH خاک در طول زمان آنکوباسیون در 60 درصد رطوبت اشباع (معادل 1/2 برابر رطوبت ظرفیت زراعی)، گویای تأیید آن است (جدول 2 و 3).

جدول 2- مقایسه میانگین تأثیر مقادیر مختلف گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر pH خاک سری خرقانی

زمان (روز)										درصد- رطوبت اشباع	گوگرد (کیلوگرم- درهکتار)
360	270	180	120	60	40	25	15	7	3		
7/74 b	7/76 bc	7/71 bc	7/70 b	7/69 ab	7/70 ab	7/71 ab	7/72abcd	7/73 abc	7/74 abc	40	0
7/81 a	7/80 a	7/78 a	7/76 a	7/74 a	7/75 a	7/77 a	7/79 a	7/81 a	7/82 a	60	
7/70 bc	7/68 cd	7/65 de	7/63 c	7/60 cd	7/61 cd	7/64 bc	7/69 bcd	7/71 bcd	7/72 bc	40	500
7/75 b	7/77 ab	7/74ab	7/70 b	7/66 abc	7/69 abc	7/75 ab	7/76 ab	7/79 ab	7/81 a	60	
7/66 c	7/64 d	7/61 e	7/60 c	7/55 d	7/56 d	7/61 c	7/64 de	7/67 cd	7/70 c	40	1000
7/68 c	7/71 c	7/68 cd	7/64 c	7/61 bcd	7/62 bcd	7/67 bc	7/73 abc	7/77 ab	7/79 ab	60	
7/55 d	7/51 f	7/44 g	7/38 e	7/33 e	7/38 f	7/51 d	7/59 e	7/64 d	7/68 c	40	10000
7/60 d	7/58 e	7/51 f	7/45 d	7/41 e	7/46 e	7/59 c	7/67 cde	7/72 bcd	7/76 abc	60	

\*\*حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد.

جدول 3- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر pH خاک سری خالدار

زمان (روز)										درصد رطوبت اشباع	گوگرد (کیلوگرم درهکتار)
360	270	180	120	60	40	25	15	7	3		
7/54 a	7/25 a	7/48 a	7/48 a	7/48 a	7/49 ab	7/50 a	7/52 ab	7/55 ab	7/55 a	40	0
7/58 a	7/55 a	7/50 a	7/51 a	7/53 a	7/54 a	7/55 a	7/57 a	7/58 a	7/59 a	60	
7/00 c	6/98 c	6/97 c	7/01 c	7/27 c	7/35 c	7/41 b	7/48 bc	7/51abc	7/54 a	40	500
7/08 b	7/07 b	7/08 b	7/15 b	7/38 b	7/44 b	7/47 ab	7/53 ab	7/55 ab	7/56 a	60	
6/86 d	6/82 d	6/84 d	6/91 d	7/13 d	7/21 d	7/28 c	7/40 cd	7/48 bc	7/53 a	40	1000
6/99 c	6/97 c	6/96 c	7/02 c	7/22 c	7/29 c	7/39 b	7/46 bc	7/53 abc	7/55 a	60	
5/41 f	5/47 f	5/91 f	6/28 f	6/65 f	6/90 f	7/08 d	7/23 e	7/38 d	7/51 a	40	10000
5/90 e	5/84 e	6/22 e	6/47 e	6/89 e	7/07 e	7/22 c	7/36 d	7/cd45	7/53 a	60	

\*\*حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد.

### هدایت الکتریکی خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در شرایط 40 و 60 درصد رطوبت اشباع، هدایت الکتریکی خاک افزایش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر آن اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت (جدول 4 و 5). بیش‌ترین مقدار افزایش هدایت الکتریکی در سری خاک خرقانی و خالدار به ترتیب به مقدار 1/72 و 3/29 دسی زیمنس بر متر نسبت به تیمار شاهد در زمان 360 روز آنکوباسیون و با کاربرد مقدار 10000 کیلوگرم گوگرد بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار افزایش هدایت الکتریکی در سری خاک خالدار نسبت به خاک خرقانی بیش‌تر بود که این ناشی از مقدار اکسیداسیون بیش‌تر گوگرد، تولید اسید سولفوریک و در نتیجه کاهش بیش‌تر pH خاک در آن می‌باشد. در این آزمایش مشخص شد که با افزایش مقدار گوگرد و دوره آنکوباسیون، از طریق اکسیداسیون گوگرد بوسیله ریزجانداران و تولید اسید سولفوریک، pH خاک

کاهش و در نتیجه حلالیت نمک‌های مختلف، هدایت الکتریکی خاک افزایش یافت. در خاک‌های مورد آزمایش، بیش‌ترین مقدار هدایت الکتریکی در پایان دوره آنکوباسیون بود که با نتایج هاشمی مجد (2012) مطابقت داشت. هم‌چنین نتایج مشابهی توسط عبدالفتاح و همکاران (1984)، اورمان و هوسین (2012)، صفا و همکاران (2013)، الکولی و همکاران (2014) گزارش شده است که مقدار هدایت الکتریکی با کاربرد گوگرد و زمان آنکوباسیون افزایش یافت. در اثر اکسایش گوگرد در خاک اسید سولفوریک تولید شده با کربنات و بی‌کربنات-های خاک (به‌ویژه کربنات‌های کلسیم و منیزیم که در خاک‌های آهکی فراوان هستند) واکنش داده و موجب انحلال آن‌ها می‌شود. در نتیجه تشکیل املاح محلول و تشکیل سولفات‌های کلسیم (گچ) و منیزیم در خاک، هدایت الکتریکی خاک افزایش می‌یابد (سلتون، 1998).



بنابراین علت افزایش هدایت الکتریکی را می‌توان به تجمع نمک‌های حاصل از اکسایش گوگرد نسبت داد. باید یادآوری کرد که مقدار هدایت الکتریکی در سوسپانسیون خاک به آب (1:2.5) کم‌تر از هدایت الکتریکی به‌وسیله عصاره اشباع است که ناشی از حجم بیش‌تر آب در سوسپانسیون خاک و آب است.

جدول 4- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر هدایت الکتریکی خاک (دسی زمینس بر متر) سری خرقانی

360	270	180	120	60	40	25	15	7	3	گوگرد	
										درصد رطوبت	اشباع
3/75 e	3/68 e	3/58 b	3/50 d	3/44 e	3/37 de	3/30 d	3/26 d	3/21 bcd	3/19 bc	40	0
3/48 f	3/41 f	3/36 b	3/28 e	3/24 f	3/18 e	3/10 e	2/96 e	2/28 d	2/67 d	60	
4/34 cd	4/27 c	4/19 ab	4/10 b	3/96 c	3/97 bc	3/73 bc	3/52 c	3/43 abc	3/30 abc	40	500
4/13 d	4/04 d	4/00 ab	3/81 c	3/68 d	3/54 d	3/33 d	3/20d	2/96 cd	2/78 d	60	
4/58 b	4/52 b	4/64 ab	4/38 a	4/20 b	4/00 b	3/86 b	3/73 b	3/62 ab	3/23 abc	40	1000
4/33 cd	4/22 c	4/26 ab	4/1 b	3/92 c	3/78 c	3/63 c	3/46 c	3/36 abc	3/11 c	60	
4/92 a	4/79 a	5/50 a	4/52 a	4/42 a	4/22 a	4/09 a	3/92 a	3/69 a	3/56 a	40	10000
4/84 bc	4/33 c	4/47 ab	4/14 b	4/00 c	3/93 bc	3/82 b	3/60 bc	3/18 bcd	3/47 ab	60	

\* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد.

جدول 5 - مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر هدایت الکتریکی خاک (دسی زمینس بر متر) سری خالدار

360	270	180	120	60	40	25	15	7	3	گوگرد	
										درصد رطوبت	اشباع
0/70 g	0/34 g	0/32 g	0/29 f	0/28ef	0/26 ef	0/25 de	0/24 d	0/23 c	0/21 de	40	0
0/24 h	0/23 h	0/22 h	0/21 f	0/19 f	0/18 f	0/17 e	0/16 d	0/14 d	0/12 f	60	
0/98 e	0/95 e	0/84 e	0/69 d	0/57 d	0/49 d	0/43bcd	0/36 c	0/32 b	0/26 cd	40	500
0/72 f	0/65 f	0/54 f	0/44 e	0/39 e	0/31 e	0/27 de	0/22 d	0/18 cd	0/16 ef	60	
1/58 c	1/45 c	1/26 c	1/02 c	0/81 c	0/72 c	0/59 bc	0/49 b	0/37 b	0/32 b	40	1000
1/21 d	1/07 d	0/94 d	0/69 d	0/55 d	0/50 d	0/37 cde	0/21 d	0/20 c	0/19 e	60	
3/50 a	3/27 a	2/60 a	2/38 a	1/85 a	1/60 a	1/05 a	0/76 a	0/58 a	0/46 a	40	10000
2/04 b	1/89 b	1/69 b	1/47 b	1/12 b	0/93 b	0/64 b	0/45 b	0/35 b	0/27 bc	60	

\* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد.

#### فسفر قابل استفاده

خاک و غلظت بالای یون کلسیم در محلول خاک می‌شود. غلظت بالای یون کلسیم در محلول خاک نیز به عنوان مثال با تبدیل یون‌های فسفات به صورت فسفات‌های مختلف کلسیم منجر به کاهش غلظت فسفات قابل جذب خاک می‌گردد (بابایی و همکاران، 1391) که احتمالاً یکی از دلایل کاهش فسفر قابل استفاده بیش‌تر از 1000 کیلوگرم بر هکتار ناشی از همین عامل است. نتایج این تحقیق با تحقیقات مهدیش و همکاران (1989) نیز مطابقت داشت که گزارش کردند تغییر قابلیت دسترسی عناصر غذایی به مقدار آهک و نسبت آهک به رس در خاک بستگی دارد و در خاک‌هایی که آهک و نسبت آهک به رس کم‌تری داشتند، تأثیر مصرف گوگرد بیش‌تر نمایان بود. کاپلان و اورمان (1998) گزارش کردند که افزایش مقدار فسفات قابل استفاده با کاربرد گوگرد، در

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در شرایط 40 و 60 درصد رطوبت اشباع، فسفر قابل استفاده خاک افزایش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر آن، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت (جدول 6). بیش‌ترین مقدار افزایش فسفر قابل استفاده در سری خاک خرقانی و خالدار به ترتیب به مقدار 0/5 و 4/1 میلی گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد، در زمان 40 و 360 روز آنکوباسیون و با کاربرد مقدار 1000 کیلوگرم گوگرد بر هکتار بود. مشاهده گردید مصرف بهینه گوگرد می‌تواند در خاک‌های آهکی منجر به افزایش میزان عناصر غذایی مانند فسفر قابل استفاده شود، ولی مصرف بیش از اندازه گوگرد با تبدیل مقدار زیادی از کربنات کلسیم خاک به گچ، باعث افزایش شوری

این افزایش، بستگی به نوع خاک دارد و مقدار 500 الی 1000 کیلوگرم بر هکتار برای افزایش مقدار فسفات قابل استفاده، پیشنهاد کردند.

نتیجه کاهش pH خاک و آزاد سازی فسفات از ترکیبات نامحلول است. الکوئی و همکاران (2014) به این نتیجه رسیدند که کاربرد گوگرد در خاک‌های با بافت‌های مختلف، سبب افزایش مقدار فسفات در خاک شد و مقدار

جدول 6- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر فسفر قابل استفاده خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

سری خالدار				سری خرقانی				درصد رطوبت	گوگرد (کیلوگرم بر هکتار)
360 روز	120 روز	80 روز	40 روز	360 روز	120 روز	80 روز	40 روز	اشباع	
10/3 e	10/1 e	10/0 e	9/7 e	10/1 abc	10/27 abcd	10/4 abc	10/4 abc	40	0
9/8 f	9/6 f	9/5 f	9/4 f	9/3 c	9/50 d	9/6 c	9/7 c	60	
10/7 d	10/5 d	10/4 d	10/1 d	10/2 ab	10/40 abc	10/6 ab	10/7 ab	40	500
10/2 e	9/8 f	9/8 e	9/6 e	9/6 bc	9/7 cd	9/8 bc	9/9 bc	60	
11/4 c	11 c	11/0 c	10/4c	10/7 a	10/80 a	10/0 a	11/1 a	40	1000
10/7 d	10/4 d	10/3 d	9/9 d	9/7 bc	9/90 bcd	10/2 abc	10/3 abc	60	
13/7 a	12/7 a	12/5 a	11/3 a	10/4 ab	10/60 ab	10/8 a	10/9 a	40	10000
12/1 b	11/7 b	11/5 b	10/7 b	9/6 bc	9/8 bcd	9/9 bc	10/03 bc	60	

\* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی دار در سطح یک درصد

کاهش یافتند که ناشی از وجود ظرفیت بافری و مقدار کربنات کلسیم بالای خاک (دارای 63 درصد آهک کل)، شوری بالای خاک (7/73 دسی زیمنس بر متر) و اثر برهم‌کنش منفی فسفر با آهن و روی موجود در خاک است. گزارش شده است که کاربرد گوگرد در خاک‌های آهکی در اثر اکسیداسیون و تولید اسید سولفوریک، pH و غلظت بی‌کربنات را کاهش و مقدار آهن و روی قابل استفاده را افزایش داد (کلباسی و همکاران، 1998؛ صفا و همکاران، 2013). اثرات مفید کاربرد گوگرد در افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی کم‌مصرف از جمله آهن و روی توسط سایر محققان نیز تأیید شده است (عبدو و همکاران، 2011؛ کریمی زارچی و همکاران، 2014، گوهرگانی، 1394، بشارتی و همکاران، 1395).

#### آهن و روی قابل استفاده

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در شرایط 40 و 60 درصد رطوبت اشباع، آهن و روی قابل استفاده خاک در سری خالدار افزایش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر آن، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت (جدول 7 و 8). در سری خالدار بیش‌ترین افزایش مقدار آهن و روی قابل استفاده به ترتیب 3/53 و 0/87 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نسبت به تیمار شاهد در زمان 360 روز آنکوباسیون با کاربرد 10000 کیلوگرم گوگرد و در شرایط 40 درصد رطوبت اشباع بود. در سری خرقانی مقدار آهن و روی قابل استفاده، با افزایش مقدار گوگرد مصرفی و با افزایش مدت زمان آنکوباسیون نسبت به تیمار شاهد

جدول 7- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر آهن قابل استفاده (میلی گرم بر کیلوگرم)

گوگرد (کیلوگرم بر هکتار)	درصد رطوبت اشباع	سری خرقانی				سری خالدار			
		40 روز	80 روز	120 روز	360 روز	40 روز	80 روز	120 روز	360 روز
0	40	10/85 a	10/60 a	10/40 a	10/20 a	6/08 cd	6/15 ef	6/18 ef	6/20 fg
	60	9/59 de	9/42 c	9/14 c	8/91 d	5/94 d	6/02 f	6/05 f	6/07 g
500	40	10/60 ab	10/43 a	10/26 a	9/80 b	6/26 c	6/56 d	6/70 d	6/87 d
	60	9/20 ef	8/88 d	8/71 de	8/43 e	6/09 cd	6/25 ef	6/32 e	6/41 ef
1000	40	10/30 bc	10/00 b	9/68 b	9/36 c	6/53 b	6/92 c	7/09 c	7/22 c
	60	9/04 f	8/81 d	8/43 ef	8/18 ef	6/20 c	6/42 de	6/54 d	6/66 de
10000	40	9/94 cd	9/43 c	9/01 cd	8/82 d	7/58 a	8/54 a	8/97 a	9/53 a
	60	8/93 f	8/54 d	8/22 f	7/82 f	6/62 b	7/40 b	7/72 b	8/00 b

\* \* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی دار در سطح یک درصد

جدول 8- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر روی قابل استفاده (میلی گرم بر کیلوگرم)

گوگرد (کیلوگرم- بر هکتار)	درصد رطوبت اشباع	سری خرقانی				سری خالدار			
		40 روز	80 روز	120 روز	360 روز	40 روز	80 روز	120 روز	360 روز
0	40	0/613 a	0/53 a	0/45 a	0/39 a	0/32 d	0/34 ef	0/36 ef	0/37 ef
	60	0/520 c	0/44 bc	0/36 bcd	0/33 abc	0/26 e	0/28 f	0/29 f	0/31 f
500	40	0/60 a	0/47 b	0/38 bcd	0/34 ab	0/40 bc	0/47 cd	0/50 d	0/52 d
	60	0/54 bc	0/41 bcd	0/33 cd	0/29 bc	0/35 cd	0/39 de	0/40 e	0/42 e
1000	40	0/58 ab	0/46 b	0/41 ab	0/36 a	0/44 b	0/54 c	0/60 c	0/61 c
	60	0/50 c	0/39 cd	0/32 d	0/29 bc	0/39 bc	0/45 d	0/49 d	0/51 d
10000	40	0/54 bc	0/43 bcd	0/39 bc	0/33 ab	0/76 a	0/93 a	1/08 a	1/17 a
	60	0/44 d	0/37 d	0/33 cd	0/27 c	0/71 a	0/79 b	0/85 b	0/89 b

\* \* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارهای کودی نشانه عدم اختلاف معنی دار در سطح یک درصد

## سولفات خاک

نتایج این آزمایش نشان داد که در خاک‌های مورد آزمایش با کاربرد گوگرد در شرایط رطوبتی، مقدار سولفات محلول خاک افزایش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار سولفات محلول خاک اختلاف معنی داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت (جدول 9). روند افزایش سولفات محلول در مقادیر بالای گوگرد مصرفی از شدت بیش‌تری برخوردار بود و بیش‌ترین مقدار آن با تیمار 10000 کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در شرایط 40 درصد رطوبت اشباع بود. مقدار افزایش سولفات در خاک خالدار و خرقانی نسبت به تیمار شاهد

4984 و 2588 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. در خاک خالدار، افزایش مقدار سولفات، ناشی از تبدیل گوگرد به اسید سولفوریک به‌وسیله ریزجانداران اکسید کننده گوگرد و تولید سولفات مورد نیاز گیاهان است. نتیجه این پژوهش با نتایج اورمان و کاپلان (2009)، اورمان و هوسین (2012) و الکولی و همکاران (2014) مطابقت داشت. هم‌چنین نتیجه مشابهی به‌وسیله توران و همکاران (2013) گزارش شده است که با مصرف گوگرد در طول 8 هفته آنکوباسیون به‌طور پیوسته pH خاک کاهش و گوگرد سولفات به‌طور خطی با کاربرد گوگرد افزایش یافت.



جدول 9- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر سولفات محلول (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

خالداری	خرقانی		درصد رطوبت اشباع		گوگرد (کیلوگرم بر هکتار)		
	360 روز	60 روز	25 روز	60 روز			
122 f	98 g	75 g	3046 f	3395 g	3641 g	40	0
85 f	63 h	39 h	2840F	3140 h	3470 g	60	
1782 d	1354 d	1166 d	3368 d	3502 e	4024 d	40	500
1274 e	994 f	823 f	2967 e	3207 f	3486 f	60	
2165 c	1859 c	1430 c	3676 c	3772 c	4144 c	40	1000
1641 d	1290 e	1096 e	3300 d	3667 d	3832 e	60	
5017 a	4435 a	4130 a	5267 a	5373 a	5708 a	40	10000
4507 b	4153 b	3878 b	4670 b	4852 b	5208 b	60	

\* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارها، نشانه عدم اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد.

### اکسیداسیون گوگرد

نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک‌های مورد آزمایش با افزایش مصرف گوگرد در شرایط رطوبتی، مقدار اکسیداسیون کاهش یافت و بین تأثیر تیمارهای مختلف بر مقدار اکسیداسیون گوگرد خاک اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ( $P < 0.01$ ) وجود داشت. بیش‌ترین مقدار آن با کاربرد 500 کیلوگرم گوگرد بر هکتار و در شرایط 40 درصد رطوبت اشباع بود. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار اکسیداسیون در دو سری خاک مورد آزمایش به ترتیب با سری خرقانی و خالداری به مقدار 80/2 و 13/7 میکروگرم گوگرد بر سانتی‌متر مربع در روز، نسبت به تیمار شاهد و در 25 روز آنکوباسیون بدست آمد (جدول 10 و 11). در این تحقیق مقدار اکسیداسیون در سری خاک خالداری بیش‌تر از خاک خرقانی بود که حاکی از شرایط مناسب آن برای فعالیت ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد دارد. در این تحقیق با افزایش کاربرد گوگرد در تیمارهای آزمایشی در شرایط مختلف رطوبتی (40 و 60 درصد رطوبت اشباع)، مشاهده شد، مقدار اکسیداسیون گوگرد کاهش یافت که این نتیجه با نتایج جانزن و بتانی (1987) هماهنگی داشت که گزارش کردند با افزایش مقدار گوگرد مصرفی در خاک‌های با بافت‌های مختلف تا حدود 1000 کیلوگرم گوگرد بر هکتار، مقدار سولفات تولیدی و اکسیداسیون گوگرد افزایش و رابطه میان آن‌ها خطی است. کاهش مقدار اکسیداسیون گوگرد در سطوح بالای کاربرد گوگرد می‌تواند ناشی از یکی یا بیش‌تر عوامل زیر باشد (جانزن و بتانی، 1987).

1- کاهش تعداد ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد در واحد سطح.  
 2- اثرات منفی pH یا تجمع زیاد مواد حد واسط اکسیداسیون گوگرد.  
 3- افزایش نمک‌های محلول  
 مهدیش و همکاران (1989) عدم افزایش میزان اکسیداسیون گوگرد در خاک همراه با مصرف بیش‌تر، آن را به اختلاط نامناسب گوگرد با خاک مرتبط دانستند. طی یک آزمایش گلخانه‌ای گزارش شده است که بهترین تیمار از لحاظ کاهش pH خاک و سولفات تولیدی کاربرد دو تن بر هکتار گوگرد بود و بیش‌تر از آن تأثیری در مقدار گوگرد اکسیده شده نداشت (کسراییان و همکاران، 1389). نتایج این آزمایش هم‌چنین نشان داد که با افزایش مقدار رطوبت خاک از 40 به 60 درصد رطوبت اشباع، مقدار اکسیداسیون گوگرد و در نتیجه کاهش pH خاک، افزایش هدایت الکتریکی و سولفات محلول خاک در سطوح مختلف کود گوگرد مصرفی کم‌تر شد. با افزایش رطوبت خاک خشک، 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 اکسیدکننده و در رطوبت‌های بالاتر به واسطه کمی اکسیژن در خاک، اکسیداسیون گوگرد کاهش می‌یابد (جانزن و بتانی، 1987).

جدول 10- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسیداسیون گوگرد خاک خرقانی (میکروگرم گوگرد بر سانتی مربع در روز)

گوگرد مصرفی (کیلوگرم بر هکتار)	رطوبت اشباع (درصد)	* 25روز	* 60 روز	360 روز
500	40	64 a	11 a	2 a
	60	25 c	9 a	1 a
1000	40	36 b	9 a	2 a
	60	25 c	8 a	1 a
10000	40	9 d	3 b	1 a
	60	7 d	2 b	0/4 a

\* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارها، نشانه عدم اختلاف معنی دار در سطح یک درصد

جدول 11- مقایسه میانگین تأثیر گوگرد در شرایط رطوبتی مختلف بر اکسیداسیون گوگرد خاک خالدار (میکروگرم گوگرد بر سانتی مربع در روز)

گوگرد مصرفی (کیلوگرم بر هکتار)	رطوبت اشباع (درصد)	* 25روز	* 60 روز	360 روز
500	40	80/2 a	39/2 a	8/7 a
	60	55/5 b	28/2 b	6/1 b
1000	40	49 c	26/8 c	5/2 c
	60	37/1 d	18/3 d	3/9 d
10000	40	14/3 e	6/4 e	1/2 e
	60	14/2 e	5/9 e	1/1 e

\* حروف مشابه در هر ستون بین تیمارها، نشانه عدم اختلاف معنی دار در سطح یک درصد.

## نتیجه گیری

گوگرد بیش تر از 1000 کیلوگرم بر هکتار در شرایط رطوبتی مختلف (40 یا 60 درصد)، هدایت الکتریکی خاک به شدت افزایش و مقدار اکسیداسیون گوگرد کاهش یافت که حاکی از توصیه غیرمعقول و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نمی باشد. بنابراین پیشنهاد می نماید که کاربرد گوگرد برای محصولات زراعی بر اساس نیاز آن ها تا حدود 1000 کیلوگرم بر هکتار باشد و باید از توصیه گوگرد در خاک هایی با شوری بالا اجتناب شود.

## تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه صنعت نفت بابت تأمین اعتبار و از ریاست محترم موسسه تحقیقات خاک و آب و همکاران بخش آزمایشگاه ها به ویژه آقای دکتر شهبازی و سرکارخانم مهندس ندا محمدی برای اجرای این پروژه تشکر و قدردانی می نماید.

نتایج این پژوهش نشان داد که دو سری خاک مورد آزمایش واکنش متفاوتی از لحاظ کاهش pH خاک، افزایش هدایت الکتریکی و سولفات محلول را در شرایط مختلف رطوبتی و در زمان های مختلف آنکوباسیون نسبت به مصرف مقادیر مختلف گوگرد از خود نشان دادند که این ناشی از متفاوت بودن خصوصیات این خاک ها (مانند مقدار آهک، مقدار سولفات اولیه و...) می باشد. بیش ترین مقدار کاهش pH و بالاترین مقدار هدایت الکتریکی، آهن، روی قابل استفاده و سولفات محلول با کاربرد 10000 کیلوگرم گوگرد در هکتار و بیش ترین فسفر قابل استفاده و مقدار اکسیداسیون گوگرد به ترتیب با تیمار کودی 1000 و 500 کیلوگرم گوگرد بر هکتار در شرایط 40 درصد رطوبت اشباع بود. هم چنین نتایج نشان داد با کاربرد

## فهرست منابع:

1. بشارتی، ح، خسروی، ه، مستشاری، م، میرزاشاهی، ک، قادری، ج. و ذبیحی، ح. 1395. بررسی اثر تیوباسیلوس، گوگرد و فسفات بر شاخص های رشد ذرت در برخی از مناطق ایران. مجله علمی و پژوهشی تحقیقات کاربردی خاک، انتشارات دانشگاه ارومیه. جلد 4، شماره 1 صفحه 112-103.

2. علی‌احیایی، م. و بهبهانی، ع. ا. 1372. شرح روش‌های تجزیه خاک. نشریه شماره 893. چاپ اول. انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب، ایران.
3. کسرایان، ع، کریمیان، ن. ع. و پذیرا، ا. 1391. تأثیر گوگرد بر فرآیند گیاه پالایی اسفناج از خاک‌های آهکی آلوده به کادمیم. مجله آب و فاضلاب. شماره 2، صفحه 52-58.
4. کشمیری، ف. 1362. گزارش مطالعات نیمه‌تفصیلی خاک‌شناسی و طبقه‌بندی دشت‌های خرم آباد - بروجرد. نشریه شماره 671، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران.
5. گوهرگانی، ج. 1394. مدیریت مصرف گوگرد بر قابلیت جذب عناصر کم‌مصرف در خاک و دانه کلزا در یک خاک آهکی. نشریه علمی و پژوهشی زیست‌شناسی خاک. جلد 3 شماره 1، صفحه 73-82.
6. ملکوتی، م. ج.، کشاورز، پ. و کریمیان، ن. ع. 1387. روش جامع تشخیص و توصیه بهینه کود برای کشاورزی پایدار. چاپ اول. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، 550 صفحه.
7. ناصری، م. ح. 1371. گزارش مطالعات اجمالی خاک‌شناسی و طبقه‌بندی اراضی دشت بسطام استان سمنان. نشریه شماره 867، انتشارات موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران.
8. Abdel-Fattah, A., Rasheed, M. A. and 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.
9. Abdou, A., Soaud, A. A., Al Darwish, F. H., Saleh, M. E., El-Tarabily, K. A., Sofian-Azirun, M. and 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.
10. Aulakh, M. S., Jaggi, R. C. and Sharma, R. 2002 Mineralization-immobilization of soil organic S and oxidation of elemental S in subtropical soils under flooded and non-flooded conditions. *Biology and Fertility of soils Journal* 35:197–203.
11. Chesnin, L. and Yien, C. H. 1951 Turbidimetric determination of available sulfates. *Soil Science Society of American Proceedings* 15:149–151.
12. El-Kholy, A. M., Ali, O. M., El-Sikhry, E. M. and 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.
13. El-Tarabily, K. A., Soaud, A. A., Saleh, M. E. and 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): 101-111.
14. Falatah, A. M. 1998. Synergistic effects of elemental sulfur and synthetic organic conditioner amendments on selected chemical properties of calcareous soils. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 12(1): 73-82.
15. Hashemimajd, K., Mohamadi farani, T. and 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.
16. Jaggi, R. C., Aulakh, M. S. and Sharma, R. 1999 Temperature effects on soil organic sulfur mineralization and elemental sulfur oxidation in subtropical soils of varying pH. *Nutrition Cycling Agroecosystem* 54:175–182.
17. Jaggi, R. C., Aulakh, M. S. and 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 Journal* 41, 52-58.
18. Janzen, H. H. and Bettany, J. R. 1987. Oxidation of elemental sulfur under field conditions in central Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 67:609-618.

19. Kalbasi, M., Filsoof F. and Rezaei-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.
20. Kaplan, M. and Orman S. 1998. Effect of elemental sulfur and sulfur containing waste in a calcareous soil in Turkey. *Journal of Plant Nutrition* 21: 1655-1665.
21. Karimizarchi, M., Aminuddin, H., Khanif, M. Y., and Radziah, O. 2014a. Elemental sulfur application effects on nutrient availability and sweet maize response (*Zea mays* L.) in a high pH soil of Malaysia. *Malaysian Journal of Soil Science* 18: 75-86.
22. Lindemann, W. C., Aburto, J. J., Haffner, W. M. and Bono, A. A. 1991. Effect of sulfur source on
23. sulfur oxidation. *Soil Science Society of America Journal* 55:85-90.
24. Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
25. McCray, J. M. and Rice, R.W. 2013. Sugarcane yield response to elemental sulfur on high pH organic soils. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 28: 280-287.
26. Modaihsh, A. S., Al-Mustafa, W. A. and 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.
27. Neilsen, D., Hogue, E., Hoyt, P. and Drought, B. 1993. Oxidation of elemental sulfur and acidulation of calcareous orchard soils in southern British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*. 73, 103-114
28. Orman, S. and 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.
29. Orman, Ş. and Kaplan, M. 2009. Determination of sulfur contents in tomato grown in greenhouses in West Mediterranean Region, Turkey. *Asian Journal Chemistry* 21(1): 484-498.
30. Safaa, M. M., Khaled, S. M. and 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.
31. Slaton, N. A. 1998. The influence of elemental sulfur amendments on soil chemical properties and Rice growth. University of Arkansas. A dissertation of Doctor of Philosophy.
32. Tisdale, S. L. and Nelson, W. L. 1958. *Soil Fertility and Fertilizers*. 2<sup>nd</sup> Ed. McMillan Publishing Company. New York, USA.
33. Turan, M. A., Taban, S., Katkat, A. V. and 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.
34. Watkinson, J. and Blair, G. 1993. Modelling the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer Research* 35:115-12.
35. Wainwright, M., Nevell W. and Grayston, S. J. 1986. Effects of organic matter on sulfur oxidation in soil and influence of sulfur oxidation on soil nitrification. *Plant and Soil* 96: 369-376.

## Sulfur Oxidation under Different Moisture Conditions and Its Effect on Some Chemical Soil Characteristics

J. ghaderi<sup>1</sup>, M. J. Malakouti, K. Khavazi, and M. H. Davoodi

Assistance professor of Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AEEEO, Iran; E-mail: ghaderij@yahoo.com.

Professor, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran;  
E-mail: mjmalakouti@modares.ac.ir

Professor of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran; E-mail: kkhavazi@yahoo.com

Assistance professor of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran; E-mail: davoodi\_mh@yahoo.com

Received: September, 2017 & Accepted: March, 2018

### Abstract

Sulfur is mainly used to reduce soil pH and increasing nutrients availability in the calcareous soils. However, this process strongly depends on oxidation rate and its affecting factors (e.g. soil moisture content). In this research, the impacts of two soil moisture regimes (40 and 60 % of saturation) and four Sulfur levels (0, 500, 1000 and 10000 kg ha<sup>-1</sup>) inoculated with *Thiobacillus* bacteria on sulfur oxidation rates and some chemical soil characteristics were assessed in a complete randomized blocks design with three replications and two soil types (Kharghani and Khaldar) during one year and under constant 25 C° temperature. In this research, soil pH, electrical conductivity (EC), Phosphorus (P), Iron (Fe), Zinc (Zn) and sulfate concentration (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) were measured. The results revealed that the pH adversely significantly (P<0.01) decreased with increasing sulfur amount, while EC, Fe, Zn and SO<sub>4</sub> increased. The highest amount of pH reduction, increasing of EC, Fe, Zn and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> observed with application of 10,000 kg Sulfur ha<sup>-1</sup>. Finally, the respective difference for pH, EC and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> compared with control treatment in the Kharghani soil were 0.38 units, 1.72 dS m<sup>-1</sup>, 2588 mg kg<sup>-1</sup> and 60 days' incubation; and in khaldar soil 2.1 units, 3.2 dS m<sup>-1</sup> and 4984 mg kg<sup>-1</sup> in 360 days' incubation. The amount of Fe and Zn available were found 3.53 and 0.87 mg kg<sup>-1</sup>, respectively indicating significant increasing compared with control plot in Khaldar soil. The highest P content was observed 0.5 and 4.1 mg kg<sup>-1</sup> in Kharghani and khaldar soils, respectively followed by 1000 kg Sulfur ha<sup>-1</sup> application. It is concluded that the amount of sulfur oxidation decreased followed by increasing in both sulfur content and incubation period. The highest increment was observed by applying 500 kg Sulfur ha<sup>-1</sup>. According to the results, Sulfur application up to 1000 kg ha<sup>-1</sup> is suggested.

**Keywords:** Electrical conductivity; pH; Phosphorus; Sulfate.

<sup>1</sup> Corresponding author: Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.