تأثیر مصرف گوگرد و باکتری‌های *Thiobacillus* بر فراهمی برخی عناصر غذایی در خاک‌هایی با ظرفیت بافری مختلف

طیبه ملک‌زاده، حسین بشارتی[1] و غلامرضا ثواقبی

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه زنجان، گرایش بیولوژی خاک؛ **Malekxadeh@yahoo.com**

دانشیار پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ **besharati1350@yahoo.com**

استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، گروه علوم و مهندسی خاک؛ **Savaghebi@ut.ac.ir**

دریافت: **93/2/8** و پذیرش: **94/11/28**

چکیده

در خاک‌های آهکی علیرغم وجود مقادیر فراوان برخی عناصر نظیر فسفر و عناصر کم مصرف، فرم محلول و قابل جذب آنها اندک بوده و کمبود آنها یکی از عوامل محدود کننده رشد گیاه در این خاکها محسوب می‌شود. کارایی مصرف گوگرد در این خاک‌ها به عوامل متعددی از جمله خاصیت تامپونی خاک و خنثی شدن اسید حاصل از اکسایش گوگرد بستگی دارد، لذا تعیین مناسب ترین مقدار مصرف گوگرد در خاک‌های آهکی با ظرفیت بافری متفاوت از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در تحقیق حاضر تأثیر سطوح گوگرد و باکتری‌های *Thiobacillus* بر فراهمی برخی عناصر غذایی در 4 خاک آهکی با ظرفیت بافری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. فاکتورها شامل گوگرد در هفت سطح (مقداری از گوگرد که بتواند با 0، 3/1، 6/25، 12/5، 25، 50 و 100 درصد مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد)، نوع خاک در چهار سطح (خاک‌هایی با 8، 14، 22و 38 درصد کربنات کلسیم معادل) بودند. نتایج نشان داد که اثر سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک و نیز اثرات متقابل آنها بر غلظت فسفر، آهن، روی، مس، منگنز و سولفات قابل جذب خاک، در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. با افزایش سطوح گوگرد تلقیح شده با *Thiobacillus*، مقدار قابل جذب عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در خاک در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. بطوریکه مقدار فسفر، آهن، روی، منگنز، مس و سولفات که در تیمار شاهد به ترتیب 11/4، 2/4 ، 2/8 ، 4/2 ، 1/4 و 48/5 میلیگرم در کیلوگرم بودند، در سطح آخر گوگرد(مقداری از گوگرد که بتواند با 100 درصد مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد + *Thiobacillus*) به ترتیب به 25/4 ، 13/1، 3/5، 28/7، 1/8 و 207/2 میلیگرم در کیلوگرم افزایش یافتند. افزایش سولفات خاک در چهار خاک مورد آزمایش بین 140تا 180 میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. بیشترین افزایش قابلیت جذب عناصر کم مصرف در خاک C1 (با 8% کربنات کلسیم معادل) در حالیکه بیشترین افزایش قابلیت جذب فسفر خاک C3 (با 22% کربنات کلسیم معادل) مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت بافری، قابلیت جذب عناصرغذایی، خاک آهکی، گوگرد، باکتری *Thiobacillus*

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: کرج، مشکین دشت، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه تحقیقات خاک و آب

مقدمه

خاک‌های آهکی دارای مقادیر زیادی کربنات کلسیم آزاد می‌باشند. این کربنات‌ها به واسطه ماهیت قلیایی که دارند، pH اغلب خاک‌های آهکی را در محدوده 7/5 تا 8/5 نگه می‌دارند. در این خاکها ظرفیت اشباع بازی غالباً 100 درصد بوده و کلسیم، یون غالب مکان‌های تبادلی در این خاک‌ها می‌باشد (لوپرت و سارز،1996).

مهم‌ترین آثار سوء فراوانی آهک در خاک‌های زراعی، واکنش آن با بعضی از عناصر کودی و تبدیل آنها به ترکیبات تقریباً نامحلول و غیر قابل استفاده توسط گیاه می‌باشد. تقریباً تمامی فسفر بومی و اضافه شده به خاک، شدیداً به صورت فسفات‌های نامحلول کلسیم و منیزیم تثبیت می‌شوند و تنها به میزان اندکی فسفر در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. به علاوه یون‌های آهن، روی، منگنز و مس نیز در این شرایط، به واسطه مقادیر زیاد کربنات کلسیم به صورت ترکیبات کم محلول در آمده و علایم کمبود آنها در گیاهان مشاهده می‌شود. همچنین یکی از دلایل بروز مشکلات تغذیه‌ای در خاک‌های آهکی، وجود غلظت بالای بیکربنات در محلول خاک و محیط ریشه است که بنیان آن به وجود آهک فراوان در خاک بر می‌گردد در خاک‌های آهکی از واکنش تعادلی بین کربنات کلسیم و CO_2، یون بیکربنات حاصل می‌شود. عامل اصلی تعیین کنندهٔ غلظت بیکربنات در محلول خاک، فشار جزئی CO_2 است.

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrows Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

با وجود مقادیر زیاد آهن کل در خاک‌های آهکی، به دلیل غیر قابل دسترس بودن فرم غالب آهن در این خاک‌ها، اغلب گیاهان در این خاک‌ها نشانه‌های کمبود آهن را بروز می‌دهند اصطلاح کمبود آهن ناشی ازآهک (lime-induced chlorosis) به این عارضه اطلاق می‌شود. pH بالا و کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی عامل ایجاد زردی و کاهش رشد گیاهان رشد یافته در چنین خاک‌هایی می‌باشند. در این بین سمیت یون‌های بیکربنات بر روی سیستم‌های فیزیولوژیک گیاه نیز مؤثر می‌باشد (پیرس و همکاران،1999).

توزیع اندازه ذرات، سطح ویژه و واکنش پذیری کربنات‌های خاک از جمله ویژگی‌هایی هستند که فرایند-های شمیایی و پدولوژیک و نیز واکنش‌های رایزوسفر گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (لوپرت و سارز،1996). در سطح ذرات کربنات کلسیم واکنش‌هایی نظیر جذب و رسوب فسفر، فلزات کمیاب و اسیدهای آلی رخ می‌دهد (تالیبودین و آرامباری، 1964؛ آمر و همکاران، 1985).

میزان واکنش پذیری کربنات‌ها نیز بر میزان تصعید آمونیوم تأثیر دارد (ریان و همکاران،1981). به علاوه کربنات بر فرایندهای ناحیه رایزوسفر نیز اثر دارد، به ویژه واکنش‌هایی که در آنها اسیدی شدن رایزوسفر از اهمیت برخوردار است. به عنوان مثال گیاهان دو لپه‌ای در شرایط کمبود آهن از ریشه خود یون های H^+ را ترشح می‌کنند که منجربه اسیدی شدن رایزوسفر و بهبود جذب آهن می‌شود. در چنین شرایطی با افزایش واکنش پذیری کربنات‌های خاک، از بازده پاسخ گیاه نسبت به شرایط کمبود کاسته می‌شود (لوپرت و همکاران،1988 ;موریس و همکاران،1990).

مدیریت خاک‌های آهکی به واسطه تأثیری که pH بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی و واکنش‌های شیمیایی بین آنها دارد و منجربه از دست رفتن و یا تثبیت برخی عناصر (از جمله فسفر و عناصر کم مصرف) می-شود، با بقیه خاک‌ها متفاوت می‌باشد. اصلاح کامل خاک-های شدیداً آهکی میسر نیست، ولی در صورت شناخت مشکل می‌توان با بکارگیری بعضی از روش‌ها تا حدی آثار سوء ناشی از زیادی آهک در خاک را کاهش داد (بنایی و همکاران، 1383).

برای دست یابی به عملکرد مطلوب در چنین خاک‌هایی بهبود روش‌های کودهی، کاربرد نواری کودهای فسفره با کم کردن سطح تماس بین کود و خاک، استفاده از ارقام مقاوم به کمبود آهن، استفاده از کلات‌های آهن، محلول پاشی کلات‌های حاوی روی و منگنز و نیز استفاده از گوگرد به عنوان یک ماده اصلاحی برای کاهش میزان pH خاک و افزایش حلالیت برخی عناصر غذایی از جمله روش‌های تعدیل آثار سوء زیادی آهک در این خاک‌ها می‌باشند. سالانه بیش از دو میلیون تن گوگرد در کشور تولید می‌شود. گوگرد ارزانترین و مقرون به صرفه-ترین ماده اسیدزا جهت بهبود وضعیت تغذیه گیاهان در خاک‌های اهکی می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیر مصرف مقادیر مختلف گوگرد عنصری تلقیح شده با باکتری‌های اکسیدکنند ه آن (*Thiobacillus*) بر فراهمی و قابلیت جذب برخی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در چهار خاک آهکی که ظرفیت بافری متفاوتی داشتند مورد بررسی قرار گرفت تا ارتباط بین آزاد شدن عناصر غذایی با مقدار گوگرد مصرفی و ظرفیت بافری خاک مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک

به منظور یافتن خاک‌هایی با ظرفیت بافری متفاوت، پس از بررسی‌های اولیه و اندازه‌گیری برخی

خصوصیات خاک (درصد مواد خنثی شونده و ...)، از خاک‌های زراعی چهار منطقه کرج، شور قلعه، چیتگر و فشند که از لحاظ بافت، درصد مواد خنثی شوند، موادآلی و ظرفیت تبادل کاتیونی و نیز مقدار قابل جذب برخی عناصر غذایی تفاوت داشتند، مقادیر کافی نمونه خاک از عمق 0-30 سانتی متری تهیه و پس از هوا خشک شدن و گذراندن از الک 4 میلی متری (برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها به روش‌های معمول و استاندارد آزمایشی تعیین گردید. (پیج و همکاران، 1982).

ترسیم منحنی تیتراسیون خاک‌ها

از آنجا که یکی از فاکتورهای منظور شده در آزمایش مقدار اسید لازم (بر حسب گوگرد) برای تنزل pH خاک تا 6/8 بود، لذا می‌بایستی ابتدا منحنی تیتراسیون خاک‌ها رسم می‌گردید. بدین منظور تعداد 12 ظرف 30 میلی لیتری برای هر خاک تهیه و در هر یک از آنها یک گرم خاک ریخته شد. سپس مقادیرمتفاوتی از اسید کلریدریک به ظرف‌ها اضافه گردید. ظرف‌ها به مدت چهار روز نگهداری شده و در فواصل زمانی مشخص pH آنها اندازه‌گیری شد. آنگاه نمودار pH در مقابل مقدار اسید مصرفی ترسیم و منحنی قدرت بافری خاک برای زمان‌های مختلف به دست آمد (نمودار 1 تا 4) (علی اصغرزاد و همکاران، 1379). در خاک شورقلعه مقادیر ۰،۴، 5، 6، 7، 8، 9، 10، 11، 12، 13و 14 میلی لیتر اسیدکلریدریک 0/25، در خاک کرج مقادیر 0، 5، 6، 7، 8، 9، 10، 11 ، 12، 13، 14 و 15 میلی لیتر اسید کلریدریک 0/125 مولار، در خاک چیتگر مقادیر 0، 4/5، 5، 5/5، 6، 6/5، 7، 8، 8/5 و 9 میلی لیر اسید کلریدریک 0/5 مولار و در خاک فشند مقادیر 0، 9، 9/5، 10، 10/5، 11، 12، 12/5، 13، 13/5 و 14 اسید کلریدریک 0/5 مولار مورد استفاده قرار گرفت. سپس از روی منحنی تیتراسیون مقدار اسید لازم برای تنزل pH اولیه خاک به pH 6/8 محاسبه گردید. آنگاه از لحاظ توازن شیمیایی(استیوکیومتری) گوگرد معادل اسید محاسبه شده تعیین گردید (جدول 2).(علی اصغرزاد و همکاران، 1379)

اعمال تیمارهای مورد نظر

کشت گلخانه‌ای سویا به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با احتساب 3 تکرار به اجرا در آمد. فاکتورهای منظور شده عبارت بودند از:

1- نوع خاک: 4 نوع خاک با ظرفیت بافری متفاوت که درصد مواد خنثی شونده آنها شامل:

خاک کرج(8%) - خاک شورقلعه(14%) -خاک چیتگر(22%)-خاک فشند(38%) که به ترتیب با C_1 ، C_2 ، C_3 و C_4 مشخص شده‌اند.

2- مقدار گوگرد: با توجه به منحنی تیتراسیون، مقدار اسیدی که لازم بود تا pH اولیه خاک به 6/8 تنزل یابد، محاسبه و سپس برای هر یک از 4 نوع خاک مقدار گوگرد معادل اسید محاسبه شده تعیین گردید. سپس مقادیر 0، 3/1، 6/25، 12/5، 25، 50 و 100 درصد گوگرد محاسبه شده در هر خاک، گوگرد به خاک اضافه شد که به ترتیب با S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 مشخص شده‌اند. جدول 2 مقادیر گوگرد مصرف شده در هر خاک را نشان می‌دهد. گوگرد عنصری پودری (اندازه ذرات 100مش) مربوط به هر گلدان جداگانه توزین و با دقت با خاک خشک موجود در هر گلدان مخلوط شد. در این پژوهش از مایه تلقیح حاوی باکتری‌های ***Thiobacillus neapolitanous*** موجود در بانک میکروبی موسسه تحقیقات خاک و آب استفاده شد بطوری‌که پس از اختلاط گوگرد با خاک، معادل 10^4 سلول به ازای هر گرم خاک گلدان حاصل شد. در گلدان‌هایی که گوگرد دریافت نکرده بودند (سطح صفر گوگرد مصرفی یا S_0) معادل گلدان‌های دیگر مایه تلقیح مصرف گردید. لذا علاوه بر تیمار شاهد بدون باکتری و گوگرد (S0T0) تیمار بدون گوگرد و حاوی باکتری (S0T1) نیز جز تیمارهای آزمایش بودند تا اثر احتمالی باکتری تنها مشخص گردد.

کشت گیاه

شش عدد بذر جوانه‌دار شده (بذور ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم استریل سطحی شده و سپس در گرمخانه با دمای 28 درجه سلسیوس جوانه‌دار شدند) در هر گلدان که رطوبت آن در حد FC بود (جدول1)، پس از تلقیح با باکتری ***Bradyrhizobium japonicum*** تهیه شده از بانک میکروبی موسسه تحقیقات خاک و آب، کشت گردید. لازم به ذکر است که مایه تلقیح باکتری همزیست سویا با جمعیت حدود 10^8 سلول در هر میلی لیتر بصورت بذرمال قبل از کشت بذور مورد استفاده قرار گرفت. تلقیح باکتری‌های همزیست (***Bradyrhizobium japonicum***) به گیاه سویا با هدف تثبیت زیستی نیتروژن و تأمین نیتروژن مورد نیاز گیا ه سویا صورت گرفت

یک هفته بعد از کشت سویا، تعداد بوته‌ها در هر گلدان به 4 بوته تقلیل یافت. در طول دوره رشد گیاه که حدود 3 ماه بطول انجامید، عملیات داشت در همه گلدان‌ها بطور یکنواخت انجام شد. رطوبت خاک گلدان‌ها به روش وزنی در حد ظرفیت مزرعه ثابت نگه داشته شد. عناصر غذایی مورد نیاز گیاه (به جز فسفر و عناصر کم

مصرف) مطابق توصیه کودی برای سویا، به صورت محلول در آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شدند. متوسط درجه حرارت روزانه 28 و شبانه 25 درجه سانتی گراد بوده و جهت ایجاد شرایط یکسان برای گلدان‌ها، هر چهار روز یکبار تمام گلدان‌ها بطور تصادفی در گلخانه جابجا شدند. گلدان‌ها در گلخانه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران با شرایط کنترل شده به مدت سه ماه نگهداری شدند.

اندازه‌گیری شاخص‌های مورد نظر در خاک

پس از گذشت سه ماه از کشت گیاه، گیاهان برداشت شده و محتوای گلدان‌ها بطور کامل مخلوط و هوا خشک گردید. نمونه‌های خاک از الک 2 میلیمتری عبور داده شدند و مقدار قابل جذب عناصر غذایی فسفر، آهن، روی، مس، منگنز و نیز pH , EC خاک‌ها به روش-های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری گردید (پیج و همکاران،1982). لازم به ذکر است علاوه بر شاخص‌های مورد نظر در خاک، شاخص‌های گیاهی از قبیل وزن خشک بخش هوایی گیاه و نیز غلظت عناصر در گیاه نیز اندازه‌گیری شدند که بدلیل حجم زیاد داده‌ها در قالب مقاله دیگری ارایه گردید.

تحلیل آماری نتایج

پس از اندازه‌گیری شاخص‌های مورد نظر در خاک، نتایج بدست آمده به وسیله نرم افزار آماری MSTATC و SAS تجزیه و تحلیل شده و محاسبات آماری مورد نظر (تجزیه واریانس، مقایسه میانگین‌ها) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن و رسم نمودارها به کمک نرم افزار Excel صورت گرفت.

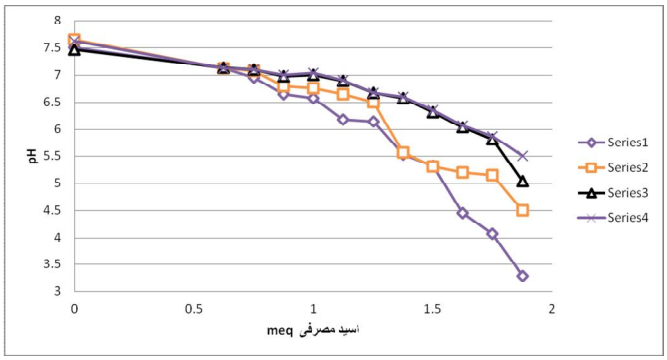
نتایج و بحث

جدول 1 برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های به کار رفته در کشت گلخانه‌ای سویا را نشان می‌دهد.

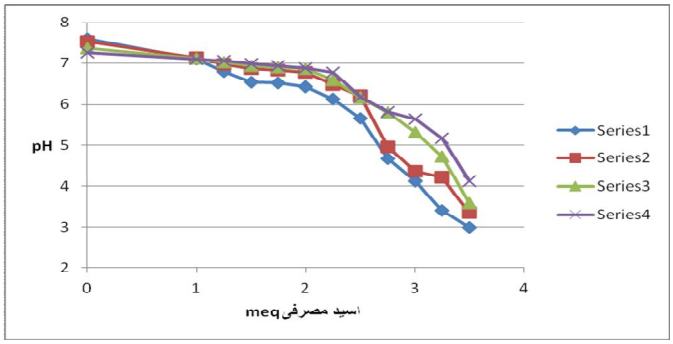
جدول 1- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در کشت گلخانه‌ای سویا

خصوصیات خاک	واحد	خاک کرج	خاک شورقلعه	خاک چیتگر	خاک فشند
pH گل اشباع خاک	---	7/5	7/91	8/02	8/18
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک	$dS\ m^{-1}$	1/09	3/51	1/08	0/38
رطوبت اشباع (SP)	درصد	58/78	43/56	55/71	55/71
رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)	درصد	28/89	21/78	27/85	27/85
کربن آلی (OC)	درصد	0/495	0/3	1/37	0/3
نیتروژن کل (N_t)	درصد	0/038	0/032	0/078	0/024
فسفر قابل جذب (P)	$mg\ kg^{-1}$	16/9	16/5	12/03	2/056
پتاسیم قابل جذب (K)	$mg\ kg^{-1}$	225/6	253/8	226/9	70/2
روی قابل جذب (Zn)	$mg\ kg^{-1}$	2/29	2/6	4/348	2/292
آهن قابل جذب (Fe)	$mg\ kg^{-1}$	2/18	3/45	3/73	1/8
منگنز قابل جذب (Mn)	$mg\ kg^{-1}$	4/12	3/15	6/46	2/92
مس قابل جذب (Cu)	$mg\ kg^{-1}$	2/38	1/56	1/4	1/43
بافت (هیدرومتر)	---	لوم رسی	لوم	لوم رسی شنی	لوم رسی شنی
ظرفیت تبادل کاتیونی	$Cmol_c/kg$	30/1	22/7	13	9/5
کربنات کلسیم معادل	درصد	8	14	22	38

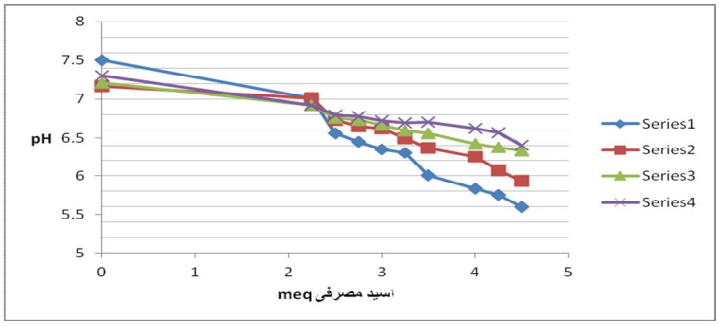
اشکال 1تا4 منحنی تیتراسیون 4خاک مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهند. همانطوریکه از این اشکال پیداست، مصرف مقادیر اولیه اسید کلریدریک کاهش جزیی را در pH سوسپانسیون خاک‌ها ایجاد نمود و با مصرف مقادیر بعدی اسید، کاهش pH محرز و بیشتر گردید و این کاهش در خاک‌هایی که کربنات کلسیم بیشتری داشتند، کمتر بود. با گذشت زمان pH تمایل بازگشت به مقادیر اولیه را نشان داد و اندکی افزایش نشان داد ولی روند تغییرات pH در دو روز سوم و چهارم تقریباً یکسان بود و ثبات نسبی را نشان داد، بنابراین نمودار مربوط به روز سوم مبنای محاسبه مقدار اسید لازم برای کاهش pH و به تبع آن مقدار گوگرد مصرفی قرار گرفت.



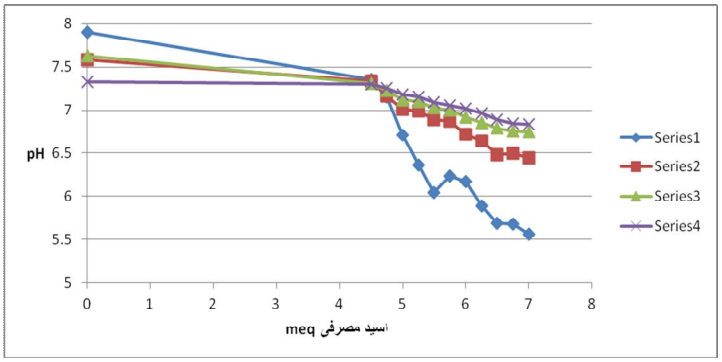
شکل 1- منحنی تیتراسیون خاک کرج



شکل 2- منحنی تیتراسیون خاک شورقلعه



شکل 3- منحنی تیتراسیون خاک چیتگر



شکل 4- منحنی تیتراسیون خاک فشند

اثر تیمارهای آزمایشی بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در خاک

تحلیل آماری نتایج نشان داد که اثر سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک آهکی و نیز اثرات متقابل آنها بر غلظت فسفر، آهن، روی ، مس ، منگنز و سولفات قابل جذب خاک، در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول 3). بطورکلی با افزایش سطوح گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus*، مقدار قابل جذب عناصر غذایی خاک در مقایسه با تیمار شاهد (بدون گوگرد و باکتری) افزایش یافت و این افزایش در مورد سطح آخر گوگرد مصرفی یعنی تیمار S6T1 چشمگیر و قابل توجه بود بطوری‌که در مورد عناصر غذایی فسفر، آهن، منگنز، مس و سولفات این تیمار نه تنها با تیمار شاهد بلکه با تمامی سطوح دیگر گوگرد مصرفی از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار داشته و در بین تیمارها بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد و تنها در مورد روی قابل جذب بین سطوح مختلف گوگرد تفوت معنی‌دار وجود نداشت ولی همه سطوح نسبت به شاهد افزایش معنی‌دار نشان دادند (جدول 4).

جدول 2- سطوح مختلف گوگرد مصرف شده در خاک‌های مختلف (گرم در گلدان)

سطوح مختلف گوگرد	مقدار گوگرد بر حسب گرم برای 2/8کیلوگرم خاک					
	S_1 (3/1)	S_2 (6/25)	S_3 (12/5)	S_4 (25)	S_5 (50)	S_6 (100)
خاک کرج	1/65	3/3	6/6	13/2	26/4	52/8
خاک شورقلعه	2/8	5/6	11/2	22/4	44/8	89/6
خاک چیتگر	3/5	7	14	28	56	112
خاک فشند	9/6	18/4	36/8	72/78	145/6	288

S_1، S_2، S_3، S_4، S_5 و S_6 به ترتیب 3/1، 6/25، 12/5، 25، 50 و 100 درصد از گوگردی هستند که در خاک‌های مختلف باید مصرف شوند تا pH اولیه خاک به 6/8 تنزل یابد

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای مختلف بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در خاک

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		فسفر	آهن	روی	مس	منگنز	سولفات	pH	EC
نوع خاک آهکی	3	204/71**	49/34**	22/6**	0/626**	135/95**	7224/2**	0/09ns	1/49**
سطوح گوگرد تلقیح شده	7	233/37**	159/05**	2/56**	0/428**	716/22**	49722/4**	0/21ns	4/44**
سطوح گوگرد تلقیح شد	21	56/61**	19/01**	1/81**	0/215**	62/88**	2252/9**	0/21*	0/94**
نوع خاک x									
خطا	64	18/22	1/31	0/64	0/07	17/49	1/201	0/12	0/07

** ، * و ns ، به ترتیب معنی‌دار در سطح 1 و 5 درصد و بدون اختلاف معنی‌دار

جدول 4- نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح گوگرد بر pH، EC و غلظت برخی عناصر غذایی در خاک

تیمار	فسفر mg Kg-1	آهن mg Kg-1	روی mg Kg-1	منگنز mg Kg-1	مس mg Kg-1	سولفات mg Kg-1	pH (1:1)	EC dS m^{-1}
S_0T_0	11/42 c	2/44 b	2/84 c	4/2 e	1/41 b	48/5 g	7/81 a	1/88 f
S_0T_1	11/96 c	2/77 b	3/25 bc	6/9 cde	1/63 ab	33/81 h	7/71 ab	2/2 e
S_1T_1	13/58 bc	2/83 b	3/51 bc	5/3 de	1/55 ab	88/92 f	7/64 ab	2/96 c
S_2T_1	13/86 bc	3/2 b	3/77 ab	9/68 bc	1/66 ab	148/91 e	7/57 ab	2/67 d
S_3T_1	14/08 bc	2/34 b	3/84 ab	8/49 bcd	1/71 ab	166/61 c	7/57 ab	3/24 b
S_4T_1	16/13 b	3/31 b	4/47 a	9/34 bc	1/81 a	163/55 d	7/58 ab	2/99 c
S_5T_1	15/16 b	3/33 b	3/97 ab	11/12 b	1/79 a	181/44 b	7/43 b	3/01 c
S_6T_1	25/4 a	13/13 a	3/54 bc	28/73 a	1/79 a	207/15 a	7/39 b	3/85 a

در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری های *Thiobacillus* می‌باشند.

جدول 5- نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح آهک خاک بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در خاک

تیمار	فسفر mg Kg-1	آهن mg Kg-1	روی mg Kg^{-1}	منگنز mg Kg-1	مس mg Kg-1	سولفات mg Kg-1	pH (1:1)	EC dS m^{-1}
C_1	17/9a	5/88a	2/57d	12/12a	1/87a	109/24d	7/5 a	3/17a
C_2	17/77a	2/82c	3/96 b	11/96a	1/76ab	140/86b	7/58a	2/68c
C_3	12/38 b	3/17c	4/9a	10/69a	1/57bc	122/21c	7/63a	2/63c
C_4	13/24b	4/81b	3/47c	7/05b	1/43c	147/13a	7/64 a	2/9b

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

C_1 ، C_2 ، C_3 و C_4 به ترتیب خاک هایی با درصد مواد خنثی شونده 8 ، 12 ، 22 و 38 درصد می باشند.

همانطوری که از جدول 5 پیداست، با افزایش درصد مواد خنثی شونده خاک غلظت فسفر ، منگنز و مس قابل جذب کاهش یافت.

مقدار قابل جذب روی از روند مشخصی تبعیت نکرد و روند تغییرات آن با تغییرات مقدار آهک خاک همخوانی نداشت، ولی در خصوص سولفات قابل جذب به موازات افزایش مقدار کربنات کلسیم خاک افزایش نشان داد که دلیل این امر مقدار مصرف بیشتر گوگرد در خاک‌هایی با مقدار آهک بیشتر می‌باشد (جدول2). مقایسه میانگین‌های برهمکنش نوع خاک و سطوح گوگرد نشان داد که در تمامی خاک ها با افزایش سطح گوگرد، غلظت فسفر قابل جذب خاک تقریباً روند افزایشی داشت و در مقایسه با تیمار شاهد افزایش نشان داد. در هر چهار خاک مورد آزمایش کمترین مقدار فسفر قابل جذب در تیمار شاهد و بیشترین مقدار آن نیز در سطح آخر گوگرد مصرفی (تیمارS6T1) مشاهده شد (جدول 6). خاک منطقه چیتگر با 22درصد کربنات کلسیم در سطح آخر گوگرد مصرفی با دارا بودن 38/5 میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر قابل جذب بیشترین مقدار فسفر قابل جذب را به خود اختصاص داد و تفاوت آن با سایر خاک‌ها معنی‌دار بود.

جدول 6- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* ونوع خاک آهکی بر میزان غلظت فسفر قابل جذب خاک

درصد مواد خنثی شونده	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		غلظت فسفر قابل جذب در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)							
8	C_1	16/61 b-i	11/68 d-i	10/46 f-i	9/43 ghi	11/16 e-i	17/26 b-h	13/22 d-i	9/27 hi
14	C_2	23/06 bc	12/24 d-i	9/05 hi	18/70b-f	13/94 d-i	10/26f-i	10/57 f-i	8/16i
22	C_3	38/49a	23/05 bc	16/56b-i	14/35d-i	14/84c-i	13/35 d-i	11/58 d-i	9/97 ghi
38	C_4	23/45 b	20/07bcd	19/37b-e	14/83 bcd	16/39b-i	13/48 d-i	17/89b-g	12/74 d-i

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری‌های *Thiobacillus* می‌باشند

مقایسه میانگین های برهمکنش سطوح مختلف گوگرد و نوع خاک نشان داد که در تمامی خاک ها با افزایش سطح گوگرد، غلظت آهن افزایش یافت اما این افزایش نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نبود. در هرچهار خاک غلظت آهن در تیمار S6T1 (مقدار گوگردی که قادر است با 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد به همراه تلقیح با باکتری‌های *Thiobacillus*) اختلاف معنی‌داری را نسبت به تیمار شاهد (بدون گوگرد و باکتری) و سایر تیمارها نشان داد. به طور کلی بیشترین میزان غلظت آهن در تمامی خاک‌ها در سطح آخر گوگرد یعنی تیمار S6T1 مشاهده شد ولی در این تیمار خاک منطقه فشند که بیشترین مقدار کربنات کلسیم را دارا بود، بیشترین غلظت آهن قابل جذب را نیز به خود اختصاص داد و تفاوت آن با سه خاک دیگر معنی‌دار بود (جدول 7).

جدول 7- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک آهکی بر میزان غلظت آهن قابل جذب خاک

کربنات کلسیم معادل(%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		غلظت آهن قابل جذب در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)							
8	C_1	17/03 b	6/01 cd	5/40 cd	5/40 cd	5/19 cd	3/65 cd	2/26 cd	3/61 cd
14	C_2	6/29 cd	2/09 cd	2/78 cd	2/58 cd	2/38 cd	2/72 cd	1/76 d	1/94 cd
22	C_3	6/51 c	2/84 cd	2/73 cd	2/12 cd	2/98 cd	2/71 cd	2/18 cd	1/62 d
38	C_4	29/74 a	3 cd	2/75 cd	2/56 cd	2/53 cd	2/33 cd	2/24 cd	2/05 cd

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری‌های *Thiobacillus* می‌باشند

مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل نوع خاک و سطوح گوگرد نشان داد که بطور کلی در تمام خاک‌ها با افزایش سطوح گوگرد غلظت روی قابل جذب خاک در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. با این وجود این افزایش در خاک C2 (خاک منطقه شورقلعه با 14درصد مواد خنثی شونده) معنی‌دار نبود، در خاک C4 (خاک

منطقه فشند با 38درصد مواد خنثی شونده) در مورد تمامی سطوح گوگرد معنی‌دار بود و در دو خاک در دو خاک C3 (خاک منطقه چیتگر با 22درصد مواد خنثی شونده) و C1 (خاک منطقه کرج با 8درصد مواد خنثی شونده) سطوح دوم گوگرد به بعد نسبت به تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری را نشان دادند (جدول 8).

جدول 8- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک بر غلظت روی قابل جذب خاک

کربنات کلسیم معادل(%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		غلظت روی قابل جذب در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)							
8	C_1	3/50 d-g	3/32 efg	3/52 d-g	2/60 fgh	2/28 f-i	2/14 ghi	2/11 ghi	1/09 i
14	C_2	3/58 d-g	3/53 d-g	4/73 b-e	4/66 b-e	3/8 c-f	4/35 b-e	3/64 d-g	39 efg
22	C_3	4/66 b-e	5/27 bc	6/72 a	5/02 bcd	5/68 ab	3/34 efg	4/64 b-e	3/86 c-f
38	C_4	3/63 d-g	3/75 c-f	4/26 b-e	3/54 d-g	3/52 d-g	3/76 c-f	3/66 d-g	1/7 hi

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری‌های *Thiobacillus* می‌باشند

مقایسه میانگین‌های برهمکنش نوع خاک و سطوح گوگرد نشان داد که در دو خاک حاوی 12 و 38درصد مواد خنثی شونده (C2وC4) سطح آخر گوگرد مصرفی (تیمار S6T1) تنها تیماری بود که با شاهد و سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار نشان داد و بیشترین غلظت منگنز را به خود اختصاص داد. در حالی که در دو خاک دیگر علاوه بر سطح آخر گوگرد مصرفی سطح پنجم گوگرد مصرفی (تیمار S5T1) نیز نسبت به شاهد افزایش معنی-داری را نشان دادند (جدول 9).

جدول 9- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک آهکی بر میزان غلظت منگنز قابل جذب خاک

کربنات کلسیم معادل(%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		غلظت منگنز قابل جذب در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)							
8	C_1	29/06 b	6/55 f-i	10/19 f-i	11/18 f-i	19/53 cd	7/69 f-i	8/84 f-i	4/69 f-i
14	C_2	39/75 a	11/95 e-h	59/10 f-i	12/33 d-g	9/01 f-i	4/94 f-i	4/26 ghi	2/84 i
22	C_3	21/37 c	19/30 cde	12/68 def	5/67 f-i	6/17 f-i	3/50 i	10/52 f-i	6/34 f-i
38	C_4	24/74 bc	6/68 f-i	3/90 hi	4/80 f-i	4/01 ghi	5/08 f-i	4/25 ghi	2/93 i

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری های *Thiobacillus* می‌باشند

اثرات متقابل نوع خاک و سطوح گوگرد نشان داد که در مجموع در خاک‌ها با افزایش سطح گوگرد غلظت مس قابل جذب خاک افزایش یافت. خاک منطقه کرج با 8 درصد مواد خنثی شونده (C1)، تیمار S6T1 با 2/36 میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین غلظت را به خود اختصاص داد. در حالی که کمترین غلظت مس نیز در همین خاک در تیمار شاهد (1/11 میلی‌گرم بر کیلو گرم) مشاهده شد (جدول 10).

جدول 10- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* ونوع خاک بر میزان غلظت مس قابل جذب خاک

کربنات کلسیم معادل (%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		گرم بر کیلوگرم)غلظت مس قابل جذب در خاک (میلی							
8	C_1	2/36 a	1/13 j	2/23 ab	2/03 a-d	2/19 abc	1/58 d-j	1/75 b-i	1/11 j
14	C_2	1/56 d-j	1/40 f-j	3/36 f-j	1/46 e-j	1/27 g-j	1/25 hij	1/51 d-j	1/67 c-i
22	C_3	1/89 a-f	1/63 d-j	1/78 b-h	1/55 d-j	1/51 d-j	1/45 e-j	1/55 d-j	1/22 ij
38	C_4	1/60 d-j	1/94 a-e	1/86 a-f	1/81 b-g	1/68 c-i	1/98 a-e	1/71 b-i	1/23 ij

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T0 و T1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری‌های *Thiobacillus* می‌باشند

بین سطوح مختلف گوگرد مصرفی به لحاظ غلظت یون سولفات در خاک تفاوت معنی‌داری وجود داشت. تمام سطوح گوگرد به جز تیمار S0T1 (سطح صفر گوگرد به همراه تلقیح با باکتری *Thiobacillus*) غلظت یون سولفات را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. تیمار S6T1 با 217/15 میلی گرم بر کیلوگرم خاک بیشترین و تیمار شاهد بدون گوگرد و باکتری(S0T0) با 48/5 میلی گرم بر کیلوگرم کمترین غلظت یون سولفات را به خود اختصاص داده و تفاوت آن ها به لحاظ آماری معنی دار بود (جدول 11).

جدول 11- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک برمیزان یون‌سولفات خاک

کربنات کلسیم معادل(%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		غلظت یون سولفات قابل جذب در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)							
8	C_1	198/2 d	181 g	158/3 m	165/7 k	90/53 s	20/85 z	10/62 \	48/75 x
14	C_2	218/1 b	177/6 h	129/3 q	161/3 l	152/6 n	148 o	55/79 v	81/35 t
22	C_3	191/6 f	171/3 i	168/4 j	157/5 m	142/7 p	110/7 r	15/22 [	20/40 z
38	C_4	220/8 a	159/9 e	198/3 d	181/9 g	206/9 c	76/21 u	53/63 w	43/50 y

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری های *Thiobacillus* می‌باشند

بین خاک‌های آهکی مختلف تفاوت معنی داری به لحاظ غلظت یون سولفات وجود داشت. به طوری که همگام با افزایش درصد موادخنثی شونده غلظت یون سولفات به طور معنی داری افزایش یافت(جدول 5). مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح گوگرد و نوع خاک نشان داد که با افزایش سطوح گوگرد، غلظت یون سولفات در تمام خاک‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت. خاک حاوی 38 درصد مواد خنثی شونده و مصرف مقادیری از گوگرد که بتواند 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک را خنثی نماید بیشترین غلظت سولفات (230/8 میلی گرم بر کیلوگرم) را به خود اختصاص داد. در حالی که خاک حاوی 8 درصد مواد خنثی شونده در سطح صفر گوگرد به همراه تلقیح با باکتری *Thiobacillus* کمترین میزان سولفات (0/62 میلیگرم برکیلوگرم) را دارا بود (جدول 11).

تحلیل آماری نتایج نشان داد که اثر سطوح مختلف گوگرد و نیز سطوح نوع خاک بر میزان pH خاک معنی‌دار نبود. این در حالی که اثرات متقابل نوع خاک و سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* بر میزان واکنش خاک در سطح 5 درصد معنی‌دار بود (جدول3). مقایسه میانگین‌های برهمکنش سطوح گوگرد و نوع خاک نشان داد که با افزایش سطوح گوگرد میزان pH در تمامی خاک‌ها کاهش یافت. اما این میزان کاهش در هیچ یک از خاک‌ها در مقایسه با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. تنها در خاک C1و C4 در تیمار S6T1 (مقدار گوگردی که لازم است تا 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک را خنثی نماید به همراه تلقیح با باکتری تیو باسیلوس) در مقایسه با تیمار شاهد واکنش خاک به طور معنی داری کاهش یافت (جدول 12).

جدول 12- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد به همراه باکتری *Thiobacillus* و نوع خاک آهکی بر میزان واکنش خاک

کربنات کلسیم معادل (%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		واکنش خاک							
8	C_1	73/06 ef	7/19 def	7/38 a-f	7/37 a-f	7/53 a-f	7/63 a-f	7/90 abc	7/91 ab
14	C_2	7/25 b-f	7/44 a-f	7/44 a-f	7/58 a-f	7/52 a-f	7/60 a-f	7/97 a	7/81 a-d
22	C_3	7/20 c-f	7/36 a-f	7/52 a-f	7/68 a-f	7/72 a-e	7/76 a-e	7/78 a-d	8/07 a
38	C_4	7/01 f	7/56 a-f	7/60 a-f	7/74 a-e	7/79 a-d	7/79 a-d	7/78 a-d	7/82 a-d

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S_0 ، S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، S_5 و S_6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T_0 و T_1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری‌های *Thiobacillus* می‌باشند

تحلیل آماری نتایج نشان داد که اثر نوع خاک ، سطوح مختلف گوگرد و نیز اثرات متقابل آنها بر میزان EC عصاره خاک در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول 3). مقایسه میانگین‌های بر همکنش سطوح گوگرد ونوع خاک نشان داد که در تمام خاک‌ها میزان EC در سطح آخر گوگرد (تیمار S6T1) نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود و نسبت به تیمار شاهد نیز اختلاف معنی‌داری را نشان داد. به طور کلی در تمامی خاک‌ها متناسب با افزایش سطح گوگرد میزان هدایت الکتریکی عصاره خاک افزایش یافت. به طورکلی در تمام خاک‌ها میزان EC در دو تیمار S5T1 و S6T1 نسبت به بقیه تیمارها بیشتر بود که در تمامی موارد اختلاف معنی‌داری را نیز نسبت به شاهد نشان می‌داد (جدول 13).

لازم به ذکر است که با توجه به بالا بودن درجه کارایی همزیستی باکتری‌های مورد استفاده، هیچیک از گیاهان کمبود نیتروژن در طی دوره آزمایش نشان ندادند که این امر حاکی از تأمین نیتروژن از طریق همزیستی بوده است. نتایج مربوط به اندازه‌گیری شاخص‌های گیاه در قالب مقاله‌ای جداگانه قبلاً منتشر شده است.

جدول 13- مقایسه میانگین بر همکنش سطوح مختلف گوگرد و نوع خاک بر میزان هدایت الکتریکی عصاره خاک

کربنات کلسیم معادل (%)	نوع خاک	سطوح مختلف گوگرد به همراه تیو باسیلوس							
		S_6T_1	S_5T_1	S_4T_1	S_3T_1	S_2T_1	S_1T_1	S_0T_1	S_0T_0
		هدایت الکتریکی محلول خاک (دسی زیمنس بر متر)							
8	C_1	4/79a	3/24 b	3/21 d-g	3/11 d-g	3 d-h	2/76 f-i	2/37 ijk	1/93 k
14	C_2	3/50 cd	3/44 cde	2/94 e-h	2/93 e-h	2/29 ijk	2/90 e-h	2/07 jk	1/35 l
22	C_3	3/75 c	2/99 d-h	2/91 e-h	2/67 ghi	2/75 ghi	2/51 hij	1/18 l	2/32 ijk
38	C_4	3/35 cde	3/03 d-h	30/15 d-g	3/13 d-g	3/29 c-f	3/16 d-g	3/08 d-g	1/20 l

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد به روش دانکن می‌باشند.

S0 ، S1 ، S2 ، S3 ، S4 ، S5 و S6 به ترتیب مقدار گوگردی که بتواند با 0، 3/1 ، 6/25 ، 12/5 ، 25 ، 50 و 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش دهد

T0 و T1 به ترتیب بدون تلقیح *Thiobacillus* و تلقیح شده با باکتری های *Thiobacillus* می‌باشند

بحث

عواملی که بر فسفر موجود در خاک، تثبیت و قابلیت جذب آن توسط گیاهان مؤثرند به 4 دسته کلی شامل ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های گیاه، شرایط اقلیمی و مدیریت زراعی تقسیم می‌شوند. ویژگی‌های خاک عواملی نظیر کربنات‌های کلسیم، اکسیدهای آهن و آلومینیوم، رس‌ها و pH خاک را شامل می‌شوند. درباره تأثیر pH بر جذب سطحی فسفر در خاک گزارش‌های متفاوتی ارائه شده است. همبستگی معنی‌دار مثبت (مهادی و تایلور 1989) و همبستگی معنی‌دار منفی (کاپلان و همکاران 1988) تغییرات pH با جذب سطحی فسفر مشاهده شده است. این مشاهدات متناقض را می‌توان توسط اثرات pH بر روی گونه‌های متفاوت یونی فسفر جذب شده، میزان بار و پتانسیل الکتروستاتیک سطوح جذب کننده خاک توضیح داد (بارو 1984). همچنین pH نقش مهمی در حلالیت و رسوب کانی‌های فسفره خاک دارد (لیندسی 1979). در اثر اکسایش گوگرد و کاهش موضعی pH خاک در اطراف ریشه‌های گیاه، حلالیت عناصر تثبیت شده در خاک‌های آهکی افزایش می‌یابد (سیفوئنتز و لیندمن،1993) و در نهایت جذب عناصر توسط گیاه نیز افزایش می‌یابد. گودرزی (1383) گزارش کرد که مصرف گوگرد در خاک‌های آهکی سبب افزایش غلظت فسفر در بافت گیاه گندم شد. افزایش شدت اکسایش گوگرد در خاک و تولید اسید سولفوریک و به دنبال آن کاهش موضعی pH خاک موجب افزایش میزان آهن قابل جذب خاک می‌شود (ملکوتی و رضایی 1380)

به طور کلی عواملی که حلالیت منگنز و شرایط اکسید و احیایی خاک را متأثر می‌سازند قابلیت جذب منگنز را برای گیاهان تعیین می‌کنند. از جمله مهم‌ترین این عوامل pH خاک می‌باشد. کاهش pH خاک باعث افزایش حلالیت منگنز در خاک شده که افزایش قابلیت جذب آن را به دنبال دارد. کاهش pH و در نتیجه آزاد شدن عناصر غذایی تثبیت شده می‌تواند باعث افزایش قابلیت جذب آنها می‌شود (مدیهیش و همکاران،1989). افزایش اکسایش گوگرد و کاهش موضعی pH خاک موجب افزایش روی قابل جذب در خاک و به دنبال آن جذب بیشتر روی توسط گیاه می‌شود (ملکوتی و رضایی 1380). کاپلان و ارمان (1998) در صورت مخلوط شدن گوگرد با خاک و اکسایش آن، نقاطی با واکنش اسیدی در خاک پدید می‌آید که شرایط مساعدی را برای انحلال و جذب بیشتر و سریعتر آهن، روی، مس و منگنز فراهم می‌آورد (خادم 1386). بررسی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که کاربرد گوگرد همراه با باکتری‌های تیوباسیلوس در خاک، سبب ایجاد تغییرات معنی‌داری در پارامترهای اندازه‌گیری شده در خاک، نسبت به شاهد بدون گوگرد شده است. به طوری که غلظت سولفات، فسفر، آهن و روی مس و منگنز قابل جذب در تمامی خاک ها افزایش یافت. همچنین با افزایش سطوح گوگرد، روند صعودی غلظت سولفات قابل جذب نیز در تمامی خاک‌ها مشاهده شد. به طور کلی استفاده از بالاترین تیمار گوگردی یعنی سطحی از گوگرد که در آن گوگرد با 100 درصد از مواد خنثی شونده خاک واکنش می داد به همراه

104 سلول باکتری در هر گرم خاک، بیشترین غلظت سولفات قابل جذب را در تمامی خاک‌ها نشان داد.

در حضور باکتری‌های *Thiobacillus* گوگرد در خاک اکسید شده و با تولید اسید سولفوریک موجبات کاهش واکنش خاک را فراهم می‌آورد. کاپلان و ارمان (1998) و مدیهش و همکاران (1989) نتایج مشابهی را از استفاده از گوگرد عنصری در کاهش pH خاک گرفتند. ضمن اکسایش گوگرد مقداری اسید سولفوریک در محیط‌زیست باکتری‌ها تولید می‌شود (ویشنیاک و سنتر،1975) که در صورت قابل توجه نبودن خاصیت تامپونی محیط، کاهش قابل ملاحظه‌ای در pH عارض می‌گردد (ویشنیاک و سنتر،1975) خاصیت بافری خاک به وجود رس، مواد آلی، آهک، ترکیبات فسفره و بسیاری از ترکیبات شیمیایی دیگر برمی‌گردد. هرگاه مقدار اسید تولید شده در اثر اکسیداسیون گوگرد، توان خنثی کردن عوامل بافر را دارا باشد، pH خاک کاهش می‌یابد. کاهش pH در تمام سطوح گوگرد مصرفی نسبت به شاهد بیانگر کافی بودن اسید تولید شده در اثر اکسایش گوگرد می‌باشد. از طرفی این احتمال که آهک موجود در خاک از نوع غیرفعال بوده (آهک درشتی که توسط عوامل پوشش دهنده مانند رس، مواد آلی و ... پوشیده شده است) که در واکنش خنثی کردن شرکت نکرده است نیز وجود دارد (بشارتی، 1377).

در اثر اکسایش گوگرد در خاک اسید سولفوریک تولید شده با کربنات و بیکربنات‌های خاک (به ویژه کربنات‌های کلسیم و منیزیم که در خاک‌های آهکی فراوان هستند) واکنش داده و موجب انحلال آن‌ها می‌شود. در نتیجه تشکیل املاح محلول و تشکیل سولفات های کلسیم و منیزیم در خاک شوری افزایش می‌یابد (سیفوئنتز و لیندمن،1993). افزایش شوری خاک توسط مدیهش و همکاران (1989) نیز گزارش شده است. با توجه به آهکی بودن خاک‌های مورد آزمایش در این مطالعه عناصر کلسیم و منیزیم در آن به وفور یافت می‌شوند . اکسایش گوگرد در خاک نیز منجر به تولید یون سولفات (SO_4^{2-}) می‌شود، افزایش غلظت این سه یون در خاک باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌گردد. (فینچ و همکاران ، 2004). لذا افزودن سطوح گوگرد باعث بالا رفتن EC شده به گونه‌ای که در بالاترین سطح گوگرد، EC خاک به حدود 4/7 ds m-1 رسید. علت افزایش EC را می‌توان به تجمع نمک های حاصل از اکسایش گوگرد نسبت داد تجمع نمک های حاصل از افزایش گوگرد در سطوح فوقانی باعث شوری خاک می‌شود. (فینچ و همکاران 2004). در اینجا نیز باید به این نکته توجه داشت که EC خاک در عصاره 1:1 به دست آمده و از آنجا که مقدار بیشتر آب موجب رقیق شدن محلول خاک می‌شود لذا EC عصاره 1:1 نسبت بهEC گل اشباع پایین تر اندازه‌گیری شده است. کاپلان و آرمان (1998) نیز در آزمایش گلخانه‌ای و مزرعه‌ای در خاک-های آهکی پی بردند که مصرف گوگرد، علاوه بر افزایش جذب عناصر غذایی باعث کاهش pH و افزایش EC خاک می‌شود. آهن از جمله عناصری است که قابلیت جذب آن در خاک شدیداً به pH وابسته است به طوری که با یک واحد افزایش pH خاک، فعالیت Fe^{3+} و Fe^{2+} به ترتیب 1000 و 100 مرتبه کاهش می‌یابد (لیندسی 1979).

به همین دلیل کمبود آهن در خاک‌های آهکی و با pH بالا بروز می‌کند. به طور کلی حلالیت ترکیبات آهن در خاک‌هایی با pH ، 8 و بالاتر، کمتر از ترکیبات روی و منگنز است. بنابراین نقش ترکیبات معدنی آهن در تأمین نیاز غذایی گیاهان، بسیار اندک می‌باشد. قسمت عمده آهن محلول موجود در خاک، به صورت کمپلکس‌های طبیعی با ترکیبات آلی موجود در خاک می‌باشد. مهم ترین عامل ایجاد کمبود آهن در خاک‌های آهکی، تأثیر یون بیکربنات در کاهش جذب آهن و انتقال آن به برگ‌های گیاه است. در پاره‌ای موارد علت زردی برگ گیاهان، با وجود غلظت زیاد آهن در برگ آنها، غیر متحرک و در دسترس نبودن ترکیبات آهن موجود در برگ می‌باشد (باوارسکو و همکاران، 1999). تاکنون علت غیر فعال شدن آهن در برگ که به عنوان «تناقض کلروز آهن[1]» شناخته می‌شود، کاملاً مشخص نشده است (رومهلد،1997).

در سال 1989، پاپاستیلیانو[2] پس از بررسی 35 مزرعه بادام زمینی در قبرس به این نتیجه رسید که در اراضی که درصد آهک آنها 20 تا 25 درصد و میزان آهن آنها کمتر از 2/5 میلی‌گرم در کیلوگرم باشد، گیاهان علایم کمبود آهن را نشان می‌دهند. گوگرد در اثر اکسیداسیون و تولید اسید سولفوریک شرایط لازم را برای کاهش pH خاک در مقیاس کوچک و در اطراف ذرات خود ایجاد می‌کند بنابراین می‌تواند به ویژه در منطقه رایزوسفر در انحلال ترکیبات نامحلول و آزاد شدن عناصر غذایی مؤثر واقع شود (خادم 1386). اثرات مفید کاربرد گوگرد در افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی کم مصرف از جمله آهن توسط بشارتی (1377)، سیفوئنتس (1993) و مدیهش و همکاران (1989) به اثبات رسیده است. تغییر یک واحد pH می‌تواند حلالیت عناصری مثل روی را در

1. Fe chlorosis paradox
2. Papastylianou

خاک 100 برابر افزایش و یا بر عکس کاهش دهد (لیندسی 1979). پس با تغییر ناچیز واکنش خاک هم می‌توان انتظار افزایش حلالیت عناصر غذایی مثل روی را داشت. کلباسی و همکاران (1988) گزارش کردند که مصرف گوگرد به طور معنی‌داری pH و غلظت بیکربنات را در خاک نسبت به شاهد کاهش، و میزان عناصر غذایی قابل جذب مثل منگنز، روی و آهن را افزایش داد. بشارتی و همکاران (1377) نیز در تحقیقاتی چنین نتایجی را به دست آوردند. این در حالی است که برخی محققان استفاده از گوگرد را در تغییر روی قابل جذب بی‌تأثیر دانسته‌اند (مدیهش و همکاران 1989). مهم ترین عامل کنترل کننده میزان تأمین روی و منگنز در خاک‌های آهکی، pH خاک می‌باشد. در شرایط pH قلیایی، مقدار روی محلول در خاک به شدت کم می‌شود. بنابراین کمبود عناصر روی و منگنز به طور کامل وابسته به pH خاک است. به طوری که با افزایش هر واحد pH خاک، غلظت این عناصر در محلول خاک 100 برابر کاهش می‌یابد (لیندسی،1972). در سطوح بالای pH ، روی به فرم ترکیبات نا محلولی نظیر هیدروکسید های روی ($Zn(OH)_2$ و $Ca,Zn(OH)_4$) و کربنات روی، در خاک رسوب می‌کند. در شرایط قلیایی متوسط به واسطه حضور کلات‌های طبیعی روی و منگنز لزوماً با کمبود این عناصر مواجه نخواهیم بود. در حالی که کمبود روی و منگنز در شرایط قلیایی شدید، معمول است (فینک،1982). فرم های سولفات ($ZnSO_4$, $MnSO_4$) و اکسید روی(ZnO) و اکسید منگنز (MnO)، معمول‌ترین کودهای معدنی روی و منگنز در خاک می‌باشند. مارشنر (1988) در تحقیقات خود نشان داد که در بین عناصر کم مصرف منگنز بیشترین عکس‌العمل را به مصرف گوگرد نشان داد. به طوری که کاربرد هر میزان از گوگرد باعث افزایش درجه فراهمی منگنز شد. لیندسی (1979) نشان داد که حلالیت مس در خاک توسط رابطه زیر کنترل می‌شود. این واکنش نشان می‌دهد که به ازای یک واحد تغییر pH حلالیت یون +Cu2 صد برابر تغییر می‌کند. $\text{Log } Cu^{2+} = 2/8 + 2pH$

فهرست منابع:

1. بشارتی، ح. 1377. بررسی اثرات کاربرد گوگرد همراه با گونه‌های *Thiobacillus* در افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی در خاک. پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
2. بنایی، م.، مومنی.ع.، بای بوردی. م. و م. ج. ملکوتی.1383. خاک‌های ایران تحولات نوین در شناسایی، مدیریت و بهره-برداری. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، انتشارات سنا. تهران، ایران.
3. علی اصغرزاد، ن.، ساعدی، س. و زمزمی، س. 1379. بررسی کارایی باکتری‌های اسید دوست جنس تیوباسیلوس در اکسایش گوگرد و کاهش pH خاک. مجله دانش کشاورزی. شماره های 1و2. جلد8. صفحات74-91.
4. خادم، ا. گلچین، ا. شفیعی، س. زارع، ا. 1393. تأثیر کودهای دامی و گوگرد بر میزان جذب عناصرغذایی توسط ذرت (Zea mays) . نشریه زراعت (پژوهش و سازندگی)، شماره 103، ص. 1-10.
5. قربانی نصرآبادی، ر. 1380. بررسی تأثیر کود میکروبی گوگرد بر توان تثبیت بیولوژیک نیتروژن در سیستم همزیستی سویا- بردی ریزوبیوم ژاپنیکوم. پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
6. گودرزی، ک .1383 . بررسی اثرات گوگرد و کمپوست بر افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی خاک و عملکرد گندم . روشهای نوین تغذیه گندم (مجموعه مقالات .) دفتر طرح خودکفایی گندم -وزارت جهاد کشاورزی.
7. ملکوتی، م. ج. و ح، رضایی. 1380. نقش گوگرد، کلسیم و منیزیم در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی. چاپ اول. نشر آموزش کشاورزی. ص 1-32.
8. Amer, E.A., Mahmoud, A.and Sabel, V.. 1985. Zeta potential and surface area of calcium carbonate as related to phosphate sorption. Soil Science Society of America Journal 49: 1137-1142.
9. Bavaresco, L., Giachino E., and Colla, R.. 1999. Iron chlorosis paradox in grapevine. Journal of Plant Nutrition. 22: 1589-1597.

10. Cifuentes, F. R. and Lindemann, W. C. 1993. Organic matter stimulation of elemental sulfur oxidation in calcareous soil. Soil Science Society of America Journal , 57: 727-731.
11. Finck, A. 1982. Fertilizers and Fertilization. Verlag Chimie, Weinheim.
12. Fuehring, H.D. 1973. Response of crops grown on calcareous soils to fertilization. In: FAO Soils Bulletin 21 - Calcareous Soils. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
13. Kalbasi, M., Filsoof, F., and Rezai-Nejad, Y.. 1988. Effect of sulfur treatment on yield and uptake of Fe, Zn and Mn by corn, sorghum and soybean. Journal of Plant Nutrition 11: 1353-1360.
14. Kalbasi, M., Manuchehri, N. and Filsoof, F.. 1986. Local acidification of soil as a means of alleviates iron chlorosis on quince orchards. Journal of Plant Nutrition . 9 : 1001- 1007.
15. -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.
16. Lindsay, W.L. 1972. Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils. In: J.J. Mortvedt et al. (Ed.). Micronutrients in Agriculture. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI. pp. 41-57.
17. Lindsay, W.L. 1979. Chemical Equilibria in Soils. John Wiley & Sons, New York. USA.
18. Loeppert, R.H., Geiger, S.C., Hartwig, R.C. and Morris, D.E.. 1988. A comparison of indigenous soil factors influencing the Fe-deficiency chlorosis of sorghum and soybean in the calcareous soils. Journal of Plant Nutrition 11:1481-1482.
19. Loeppert, R.H. and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum, In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnson and M.E. Sumner (eds.). Methods of Soil Analysis Part 3 Chemical Methods. SSSA Special Publication No. 5. Madison, WI. pp. 437-474.
20. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Edition. Academic Press, London. UK.
21. Modaihsh, S., Al-mustafa, W. A. and Metwally A. E.. 1989. Effect of elemental sulfur on chemical changes and nutrient availability in calcareous soils. Plant and Soil. 116:95-101.
22. Morris, D.R., Loeppert R.H. and Moore, T.J. 1990. Indigenous soil factors influencing Fe chlorosis of soybean in calcareous soils. Soil Science Society of America Journal, 15: 1329-1336.
23. Page, A.L. Miller R.H. and Keeny, D.R. 1982. Methods of soil analysis part 2. Chemical and Microbiological Properties. Second edition. Madison Wisconsin U.S.A.
24. Papastylianou, I. 1989. Effect of selected soil factors on chlorosis of peanuts grown in calcareous soils in Cyprus. Plant and Soil, 117: 291-294.
25. Pearce, R.C., Li, Y.and Bush, L.P. 1999. Calcium and bicarbonate effects on the growth and nutrient uptake of burley tobacco seedlings: hydroponic culture. Journal of Plant Nutrition, 22: 1069-1078.
26. Romheld, V. 1997. The chlorosis paradox: Fe inactivation in leaves as a secondary event in Fe deficiency chlorosis. In: 9th International Symposium on Iron Nutrition and Interaction in Plants. Hohenheim, Stuttgart, Germany.
27. Ryan, J., Curtin , D.and Safi, I.. 1981. Ammonia volatilization as influenced by calcium carbonates particle size and iron oxides. Soil Science Society of America Journal , 45: 338-341.

28. Talibudeen, O. and Arambarri, P.. 1964. The influence of the amount and the origin of calcium carbonates on the isotopically-exchangeable phosphate in calcareous soils. Journal of Agricultural Science . 62: 93-97.
29. Vishniac, W. and Santer, M. 1957. The Thiobacilli. Bacteriological Reviews., 21: 195-213.