



## Investigating phosphorus distribution and availability in presence of organic matter and elemental sulfur along with thiobacillus bacteria in two soils with different texture

Hossein Rafiee<sup>1</sup>, Mahboubeh Zarabi<sup>2✉</sup>, Shahriar Mahdavi<sup>3</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran, Email: [rafie27181@gmail.com](mailto:rafie27181@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran, Email: [mzarrabi@malayeru.ac.ir](mailto:mzarrabi@malayeru.ac.ir)

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran, Email: [smahdaviha@yahoo.com](mailto:smahdaviha@yahoo.com)

Article Info	ABSTRACT
<b>Article type:</b> Research Article	<p>Phosphorus (P) is often lacking in calcareous soils. To investigate the effect of organic matter and elemental sulfur (S) on P availability and fractions in two calcareous soil with different textures (Clay → loam and Loamy → sand) and total iron and aluminum concentrations, incubation studies were carried out for 12 weeks. This study was conducted in the soil science laboratory of Malayer University in 2019. The treatments include the simple treatment of sheep manure (organic matter=OM) (0, and 2 %), S (0, 0.25, and 0.5 %), and integrated treatment of OM and S in the presence of Thiobacillus bacteria. Every week, P concentration in control and treated soils was measured. At the end of incubation period, EC, pH, ECC percentage, gypsum percentage, and inorganic P fractions in control and treated soils were measured, too. At the end of the incubation period, EC and gypsum percentage increased in both treated soils. The presence of OM decreased the gypsum in soils and increased P concentration in the soils. In Clay → loam soil treated with 0.25, and 0.5 percent of S, adding OM decreases the rate of P transformation, from 0.226 to 0.153 and from 0.168 to 0.154 mg kg<sup>-1</sup> week<sup>-1</sup>, respectively and in Loamy → sand soil caused an increase from 0.129 to 0.161 and from 0.125 to 0.184 mg kg<sup>-1</sup> week<sup>-1</sup>, respectively. In both soils, simple and integrated treatments increased the dicalcium phosphate fraction and decreased the octacalcium phosphate fraction, and the apatite fraction decreased in integrated treatments. In Loamy → sand soil, simple and integrated treatments increased the aluminum phosphate fraction. The results showed that integrated treatment of OM with 0.25% of S in both soils increased the P availability, and despite the fixation of P in Loamy → sand soil, due to high total iron and aluminum content, OM increased the P availability in Loamy → sand soil.</p>
<b>Article history:</b>	
<b>Received:</b> Aug. 15, 2022	
<b>Revised:</b> Dec. 10, 2022	
<b>Accepted:</b> Dec. 17, 2022	
<b>Published online:</b> Jan. 22, 2022	
<b>Keywords:</b> Calcareous soil, Elemental sulfur, Gypsum, Organic matter, Phosphorus availability.	
Cite this article Rafiee, H., Zarabi, M., & Mahdavi, S. (2023). Investigating Phosphorus Distribution and Availability in Presence of Organic matter and Elemental Sulfur along with Thiobacillus Bacteria in two Soils with Different Texture, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i> , 53 (11), 2625-2641. <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.347224.669341">https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.347224.669341</a>	
© The Author(s).	Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.347224.669341">https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.347224.669341</a>	

## بررسی توزیع و فراهمی فسفر در حضور ماده آلی و گوگرد عنصری به همراه باکتری تیوباسیلوس در دو خاک آهکی با بافت متفاوت

حسین رفیعی<sup>۱</sup>، محبوبه ضرابی<sup>۲</sup>، شهریار مهدوی<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، ایمیل: [rafie27181@gmail.com](mailto:rafie27181@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، ایمیل: [mzarrabi@malayeru.ac.ir](mailto:mzarrabi@malayeru.ac.ir)

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، ایمیل: [smahdaviha@yahoo.com](mailto:smahdaviha@yahoo.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در خاک‌های آهکی غالباً کمبود فسفر وجود دارد. به منظور بررسی اثر ماده آلی و گوگرد عنصری بر فراهمی و توزیع فسفر در دو خاک آهکی با بافت (لومرسی و شنی لومی) و غلظت آهن و آلومینیوم کل متفاوت، مطالعات انکوباسیونی به مدت دوازده هفته در آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه ملایر در سال ۱۳۹۸ انجام شد. تیمارها شامل تیمار ساده کود گوسفندی (کود آلی) (صفر و دو درصد)، گوگرد عنصری (صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد) و تیمارهای تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری در حضور باکتری تیوباسیلوس می‌باشد. هر هفته غلظت فسفر فراهم خاک‌های شاهد و تیمار شده و همچنین در انتهای دوره انکوباسیون، EC، pH، درصد کربنات کلسیم معادل و گچ و اجزاء معدنی فسفر اندازه‌گیری شد. در انتهای دوره انکوباسیون در هر دو خاک تیمار شده، EC و درصد گچ افزایش یافت. حضور کود آلی باعث کاهش درصد گچ و افزایش غلظت فسفر فراهم خاک‌ها شد. در خاک لومی‌رسی تیمار شده با سطوح ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد گوگرد عنصری، افزودن کود آلی، باعث کاهش سرعت تغییر شکل فسفر (ضریب b معادله توانی)، به ترتیب از ۰/۲۲۶ به ۰/۱۵۳ و از ۰/۱۶۸ به ۰/۱۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هفته و در خاک شنی لومی باعث افزایش، به ترتیب از ۰/۱۲۹ به ۰/۱۶۱ و از ۰/۱۲۵ به ۰/۱۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هفته شد. در هر دو خاک، تیمارهای ساده و تلفیقی موجب افزایش جزء دی کلسیم فسفات و کاهش جزء اکتاکلسیم فسفات و تیمار تلفیقی موجب کاهش جزء آپاتیت شد. در خاک شنی لومی، تیمارهای ساده و تلفیقی باعث افزایش جزء فسفات آلومینیوم شد. نتایج نشان داد در هر دو خاک، تیمار تلفیقی کود آلی با ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری موجب افزایش فراهمی فسفر شد و با وجود تثبیت فسفر در خاک شنی لومی، به دلیل آهن و آلومینیوم کل زیاد، ماده آلی باعث افزایش فراهمی فسفر این خاک شد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

### واژه‌های کلیدی:

خاک آهکی،  
فراهمی فسفر،  
گچ،  
گوگرد عنصری،  
ماده آلی.

استناد: رفیعی؛ حسین؛ ضرابی؛ محبوبه؛ مهدوی؛ شهریار، (۱۴۰۱) بررسی توزیع و فراهمی فسفر در حضور ماده آلی و گوگرد عنصری به همراه باکتری تیوباسیلوس در دو خاک آهکی با بافت متفاوت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۱)، ۲۶۴۱-۲۶۲۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.347224.669341>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.347224.669341>

## مقدمه

فسفر به عنوان یکی از عناصر پرمصرف، نقش مهمی در تولید محصول در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (Goldstein *et al.*, 1988). در خاک‌های آهکی فوسفور تحت تاثیر مقدار کربنات کلسیم، یون کلسیم محلول، اسیدیته خاک (pH) و مواد آلی خاک است (Saying *et al.*, 1990). بازده کودهای فسفاتی در زمین‌های زراعی در سال اول کشت بین ۵ تا ۲۰ درصد است (Malakouti *et al.*, 2008).

اسیدیته خاک نقش مهمی در دسترسی عناصر غذایی برای گیاهان دارد و در خاک‌های آهکی بیش‌ترین حلالیت و فراهمی فسفر در pH حدود ۶/۵ اتفاق می‌افتد (Hopkins & Ellsworth, 2005). گوگرد از جمله عناصری است که باعث کاهش pH خاک‌ها و افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک‌های آهکی می‌شود. گوگرد عنصری بوسیله باکتری‌های جنس تیوباسیلوس به اسید سولفوریک اکسید شده و باعث کاهش pH خاک می‌شود (Wang *et al.*, 2008). امروزه به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی با درجه خلوص بالا و محتوای گوگرد پایین، مشکلات کمبود گوگرد در خاک‌ها بیشتر از قبل پدیدار شده است (Hitsuda *et al.*, 2005). لذا استفاده از گوگرد عنصری در خاک‌ها می‌تواند قابلیت دسترسی عناصر مختلف از جمله فسفر را در خاک‌ها افزایش دهد (Kaya *et al.*, 2009; Safaa *et al.*, 2013). در مطالعات مختلفی اثر مثبت گوگرد عنصری در افزایش فراهمی فسفر قابل استفاده گیاه گزارش شده است (Ghaderi & Malakouti, 2014; Khadem *et al.*, 2018). همچنین نتایج تحقیقات نشان داده است که، با افزایش سطوح مصرف گوگرد عنصری در خاک‌ها، شوری خاک افزایش یافته است (Ghaderi & Malakouti, 2018; Malekzadeh *et al.*, 2016).

بخش گسترده‌ای از کشور ایران دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک است (Koocheki & Kamali, 2010). اندک بودن ماده آلی خاک در سرزمین‌های خشک و نیمه خشک و جایگاه آن در مدیریت پایدار اکوسیستم‌های کشاورزی، باعث نگاه عمیق‌تر پژوهشگران و کشاورزان به کاربرد کودهای آلی در خاک‌های زراعی شده است. ماده آلی نقش مهمی در افزایش فراهمی عناصر غذایی ضروری گیاه در خاک دارد و نه تنها ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه برای تداوم حیات ریز جانداران که نقش تبدیل عناصر غذایی به شکل قابل استفاده گیاه را دارند نیز، لازم است (Havlin *et al.*, 2005). در خاک‌های آهکی، ماده آلی با کمپلکس نمودن کلسیم محلول و کاهش غلظت آن در محلول خاک و همچنین واکنش با کربنات کلسیم موجود در خاک، از تشکیل و رسوب فسفات کلسیم جلوگیری می‌نماید و باعث افزایش فراهمی فسفر در خاک می‌شود. همچنین مواد هیومیکی، غیر هیومیکی و آنیون‌های آلی آزاد شده حاصل از تجزیه ماده آلی، با یون فسفات برای جذب شدن در مکان‌های جذبی رقابت نموده و باعث کاهش جذب فسفر در خاک می‌شود. آزاد سازی تدریجی و افزایش فراهمی عناصر غذایی ضروری گیاه از دیگر محاسن استفاده از کودهای آلی در خاک‌ها است (Zamil *et al.*, 2004).

از آنجایی که گوگرد و ماده آلی از جمله عوامل موثر در افزایش فراهمی عناصر غذایی ضروری گیاه، مثل فسفر در خاک‌ها می‌باشند، مصرف آن‌ها در خاک‌های آهکی توصیه شده است (Aria *et al.*, 2010; khavazi *et al.*, 2018; Odongo *et al.*, 2007). در مطالعه اثر اصلاح کننده‌ها بر عملکرد کیفی و کمی گیاه سیاه دانه، در کاربرد ترکیبی ورمی کمپوست و گوگرد عنصری به همراه باکتری تیوباسیلوس در خاک آهکی، افزایش ۸۴/۴ درصدی عملکرد دانه سیاه دانه نسبت به تیمار شاهد گزارش شده است (Seyyedi *et al.*, 2020). در تحقیق انجام شده توسط (Khavazi *et al.*, 2018)، کاربرد گوگرد به همراه باکتری تیوباسیلوس باعث افزایش اجزای عملکرد و جذب عناصر آهن، روی و فسفر در برگ گندم نسبت به تیمار شاهد شد. اثر مثبت استفاده از کود دامی و گوگرد عنصری به همراه باکتری‌های اکسید کننده گوگرد بر افزایش فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به ویژه فسفر و بهبود رشد گیاه گندم در خاک‌های آهکی پاکستان نیز گزارش شده است (Nadeem *et al.*, 2022). در مطالعات آنکوباسیونی انجام شده توسط (Pashapour & Moradi, 2020) در خاک‌های تیمار شده با اسید سولفوریک، سولفات آلومینیوم و گوگرد همراه با تیوباسیلوس مقدار فسفر فراهم خاک آهکی نسبت به خاک شاهد، به ترتیب ۲۴۰، ۷۰ و ۵۰ درصد افزایش یافت. نتایج مطالعه تاثیر کودهای دامی و گوگرد بر میزان جذب عناصر غذایی توسط گیاه ذرت توسط (Khadem *et al.*, 2014)، با استفاده از سه سطح تیمار گوگردی (صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد)، نشان داد میزان فسفر قابل جذب خاک با مصرف ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری در خاک افزایش و با مصرف ۰/۵ درصد گوگرد عنصری کاهش یافت.

بافت خاک نیز از جمله عوامل موثر بر بازده کودهای فسفاته و توزیع فسفر باقیمانده در خاک است (Zheng *et al.*, 2003). خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های شنی غالباً دارای ظرفیت بافری فسفر بیشتر و مقدار فسفر قابل عصاره‌گیری کمتر (Kamprath & Watson, 1980) و دارای ظرفیت جذب و نگهداری بالای فسفر می‌باشند. در مطالعه‌ی انجام شده جهت مقایسه ضریب جذب فسفر در برخی خاک‌ها،

بیشترین ظرفیت جذب فسفر در خاک‌های دارای درصد رس بیشتر به دست آمد و حداکثر ظرفیت جذب فسفر در خاک‌های حاوی ۳۷ و ۴۱ درصد رس، به ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۴۲ میلی‌گرم در گرم خاک گزارش شد (Kamali *et al.*, 2020). با توجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها، فسفر به صورت ترکیبات شیمیایی متنوع، مانند فسفات‌های کلسیم، فسفات آهن و آلومینیوم و فسفر آلی، با حلالیت و قابلیت دسترسی متفاوت در خاک یافت می‌شود (Dehghan *et al.*, 2008). فراهمی و تثبیت فسفر در خاک‌ها، تحت تاثیر واکنش‌های یون فسفات با ترکیبات حاوی کلسیم، آهن و آلومینیوم است (Havlin *et al.*, 2005). آگاهی از شکل‌های شیمیایی فسفر و تاثیر تیمارهای مختلف در توزیع آن می‌تواند در انتخاب روش مدیریتی مناسب در مزارع مفید باشد.

وجود آهک در خاک‌های زراعی یکی از عوامل موثر در کمبود عناصر غذایی مورد نیاز گیاه (مانند فسفر و عناصر میکرو) است. واکنش پذیری آهک با عناصر موجود در خاک و تبدیل آن‌ها به ترکیبات کم محلول و نامحلول از جمله اثرات سوء وجود آهک در خاک‌های زراعی است. با توجه به اهمیت فراهمی و تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی، هدف از این تحقیق بررسی توزیع و فراهمی فسفر در دو خاک آهکی با بافت و مقدار آهن و آلومینیوم کل متفاوت تیمار شده با کود گوسفندی و گوگرد عنصری به همراه باکتری تیوباسیلوس در طی دوازده هفته در شرایط انکوباسیون می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در سال ۱۳۹۸ دو نمونه خاک مرکب از شهرستان ملایر استان همدان، با بافت مختلف از محدوده جغرافیایی با عرض  $34^{\circ}19'54''$  شمالی و طول  $48^{\circ}57'40''$  شرقی و دیگری با عرض  $34^{\circ}12'35''$  شمالی و طول  $48^{\circ}42'29''$  شرقی، از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری تهیه و پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها شامل بافت به روش هیدرومتر (Bouyoucos, 1962)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Nelson & Sommers, 1983)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Allison & Moodie, 1965) و درصد گچ به روش استون (Richards, 1954) اندازه‌گیری شد. pH (Thomas, 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) (Rhoades, 1996) خاک‌ها نیز در عصاره ۱:۵ خاک به آب مقطر به ترتیب با دستگاه pH متر مدل Metrohm 744 و هدایت سنج الکتریکی مدل Jenway 4310 تعیین شد. ظرفیت زراعی خاک‌های مورد مطالعه به روش وزنی (Michael *et al.*, 2017) اندازه‌گیری شد. آهن و آلومینیوم کل (کریستالی و بی‌شکل) خاک‌ها به روش مهرا و جکسون (Mehra & Jackson, 2013) عصاره‌گیری و به ترتیب توسط دستگاه جذب اتمی مدل Varian model 220 و اسپکتروفتومتر مدل Analytik-Jena AG 205 اندازه‌گیری شدند. فسفر قابل جذب خاک‌ها به روش اولسن (Olsen, 1954) عصاره‌گیری و به روش رنگ‌سنجی مولیبدات آبی (Murphy & Riley, 1962) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (جدول ۱). اجراء معدنی فسفر نیز در خاک‌های عبور داده شده از الک ۰/۵ میلی‌متری، به روش عصاره‌گیری متوالی اندازه‌گیری شد (Jiang & Gu, 1989).

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی	واحد	خاک شماره ۱	خاک شماره ۲
بافت		لومرسی (Clay loam)	شنی لومی (Loamy sand)
شن	%	۳۹/۰	۷۹/۰
سیلت	%	۲۶/۰	۱۳/۵
رس	%	۳۵/۰	۷/۵
ظرفیت زراعی	%	۱۹/۲	۱۴/۵
pH*	-	۷/۵۴	۸/۳۲
EC*	dS m <sup>-1</sup>	۰/۱۸	۰/۱۲
کربنات کلسیم معادل	%	۱۵/۵۰	۱۴/۳۸
گچ	%	۰/۲۸	۰/۳۴
کربن آلی	%	۱/۲	۱/۱
فسفر فراهمی	mg kg <sup>-1</sup>	۴۰/۳	۱۹/۰
آهن کریستالی	mg kg <sup>-1</sup>	۵۷۰۴/۳	۱۷۰۰۰
آهن بی‌شکل	mg kg <sup>-1</sup>	۴۲۴	۵۰۰
آلومینیوم کریستالی	mg kg <sup>-1</sup>	۳۰۴/۹	۴۵۱۰
آلومینیوم بی‌شکل	mg kg <sup>-1</sup>	۱۵۵/۲	۲۲

\*: اندازه‌گیری شده در عصاره ۱:۵ خاک به آب مقطر

جهت بررسی اثر ماده آلی بر فراهمی فسفر در خاک‌ها، از کود گوسفندی (کود آلی) استفاده شد. ابتدا کود آلی از الک ۰/۵ میلیمتری عبور داده شد و برخی از ویژگی‌های شیمیایی آن شامل، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۱۰ کود آلی به آب مقطر؛ درصد کربن آلی، درصد کربنات کلسیم معادل و درصد گچ به روش‌های ذکر شده اندازه‌گیری شد (جدول ۲). برای اندازه‌گیری نیتروژن کل کود آلی از روش کج‌لدال (Sparks et al., 2020) و برای عصاره‌گیری فسفر، آهن و آلومینیوم کل، از روش هضم در اسید نیتریک غلیظ (Jones, 2001) استفاده شد، غلظت هر کدام از عناصر به روش‌های ذکر شده اندازه‌گیری شد. گوگرد عنصری (پودری) با درجه خلوص ۹۹/۵ درصد و مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس تیواکسیدانس با تعداد اندام فعال  $10^8$  باکتری در هر گرم مایه تلقیح از مرکز خدمات کشاورزی شهرستان ملایر تهیه شد.

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های شیمیایی کود گوسفندی (کود آلی)

کود آلی	pH*	EC*	کربنات کلسیم معادل	گچ	کربن آلی	نیتروژن کل	C/N	فسفر کل	آهن کل	آلومینیوم کل
		dS m <sup>-1</sup>		%						mg kg <sup>-1</sup>
گوسفندی	۸/۹۳	۱۲/۴۳	۶/۵۰	۰/۲۹	۵۶/۵۵	۲/۲۲	۲۵/۵	۴۲۲۰	۱۱۷۶	۳۰۱۴

\*: اندازه‌گیری شده در عصاره ۱:۱۰ کود آلی به آب مقطر

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در دو نوع خاک آهکی با بافت لومرسی (شماره ۱) و بافت شنی لومی (شماره ۲) در آزمایشگاه گروه خاکشناسی دانشگاه ملایر در سه تکرار انجام شد. جهت انجام آزمایش از کود گوسفندی در دو سطح (صفر و دو درصد (SM))، گوگرد عنصری در سه سطح (صفر، ۰/۲۵ درصد (ES1) و ۰/۵ درصد (ES2)) (Khadem et al., 2014) استفاده شد. مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس به مقدار سه گرم در هر کیلوگرم خاک به خاک‌های شاهد و تیمار شده جهت فراهم نمودن شرایط مناسب برای اکسیداسیون گوگرد عنصری اضافه شد. مقدار مصرف مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس بر اساس توصیه موجود بر روی بسته‌های کودی انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل خاک شاهد (CS)، تیمار ساده دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ساده ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ساده ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2)، تیمار تلفیقی دو درصد کود آلی و ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1+SM) و تیمار تلفیقی دو درصد کود آلی و ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2+SM) بود. خاک‌های شاهد و تیمار شده، به مدت دوازده هفته در دمای  $25 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد و با حفظ رطوبت در حد ظرفیت زراعی نگهداری شده و در پایان هر هفته، نمونه‌برداری از آنها انجام و غلظت فسفر فراهم نمونه‌ها به روش ذکر شده، اندازه‌گیری شد. در طول دوره انکوباسیون، رطوبت خاک‌های انکوباسیون شده به روش وزنی کنترل شد. در انتهای دوره انکوباسیون (هفته دوازدهم) قابلیت هدایت الکتریکی، pH، درصد کربنات کلسیم معادل و درصد گچ خاک‌های شاهد و تیمار شده جهت ارزیابی تغییر ویژگی شیمیایی خاک‌ها، به روش‌های ذکر شده اندازه‌گیری گردید. اجراء معدنی فسفر در خاک‌های شاهد و تیمار شده نیز در انتهای دوره انکوباسیون (هفته دوازدهم) به روش عصاره‌گیری متوالی اندازه‌گیری شد (Jiang & Gu, 1989).

سرعت کاهش فراهمی فسفر در مدت زمان دوازده هفته به صورت تابعی از زمان به کمک معادله توانی زیر محاسبه شد (Jalali, 2009):

$$q_t = at^b \quad \text{رابطه ۱}$$

در این معادله  $q_t$  غلظت فسفر فراهم در زمان  $t$  (میلی‌گرم بر کیلوگرم)،  $a$  پارامتر تعیین کننده مقدار فسفر آزاد شده در زمان صفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و  $t$  زمان (هفته) و  $b$  ضریبی است که سرعت تغییر شکل فسفر در طی زمان را (میلی‌گرم بر کیلوگرم در هفته) نشان می‌دهد و مقدار آن منفی می‌باشد. رسم نمودارها به کمک نرم افزار Excel و تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم افزار SPSS16.0 انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن با سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی خاک‌ها و کود آلی

درصد شن در خاک شنی لومی تقریباً دو برابر خاک لومرسی و pH خاک شنی لومی قلیایی متوسط و خاک لومرسی قلیایی ضعیف است.

هر دو خاک غیر شور می‌باشند. درصد کربنات کلسیم معادل، گچ و کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه مشابه هم بوده و تفاوت‌ها به ترتیب ۱/۱۲، ۰/۰۶ و ۰/۱ درصد است. مقدار فسفر فراهم در خاک لومرسی تقریباً دو برابر خاک شنی لومی می‌باشد (جدول ۱). طبق بررسی‌های به عمل آمده، هر ساله در منطقه مورد مطالعه بیش از ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل مصرف می‌شود. مقادیر آهن و آلومینیوم کریستالی در خاک شنی لومی به ترتیب ۲/۹ و ۱۴/۸ برابر خاک لومرسی است. مقدار آلومینیوم بی شکل در خاک لومرسی ۷ برابر خاک شنی لومی است. کود آلی مورد استفاده قلیایی، شور و دارای املاح محلول زیاد می‌باشد (جدول ۲). شوری کودهای حیوانی تحت تاثیر سن، رژیم غذایی، مدیریت تغذیه نشخوار کنندگان و مواد افزودنی در خوراک است (Chadwick et al., 2000).

#### قابلیت هدایت الکتریکی و pH خاک‌های شاهد و تیمار شده در انتهای دوره انکوباسیون

در انتهای دوره انکوباسیون، قابلیت هدایت الکتریکی در خاک‌های تیمار شده نسبت به خاک شاهد افزایش یافت. قابلیت هدایت الکتریکی در خاک‌های لومرسی و شنی لومی شاهد در انتهای دوره انکوباسیون به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۱۱ دسی‌زیمنس بر متر و در خاک‌های تیمار شده به ترتیب در دامنه ۱/۸۸-۰/۳۸ (خاک لومرسی) و ۲/۲۲-۰/۳۳ (خاک شنی لومی) دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. اثر تیمارها (کود آلی و گوگرد عنصری) بر افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در خاک شنی لومی بیشتر از خاک لومرسی بود و احتمالاً دلیل این امر، درصد رس و مکان‌های تبدیلی بیشتر در خاک لومرسی و در نتیجه جذب کاتیون‌های موجود در محلول خاک است. در هر دو خاک، در انتهای دوره انکوباسیون کمترین افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار ساده کود آلی (S+SM) و بیشترین قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار تلفیقی گوگرد عنصری با سطح ۰/۵ درصد و کود آلی (S+ES2+SM) مشاهده شد. جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر قابلیت هدایت الکتریکی در هفته آخر انکوباسیون را در هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر قابلیت هدایت الکتریکی در هفته آخر انکوباسیون در هر دو خاک مورد بررسی، در سطح یک درصد معنی‌دار است. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر قابلیت هدایت الکتریکی در هفته آخر انکوباسیون نشان داد، در هر دو خاک لومرسی و شنی لومی قابلیت هدایت الکتریکی در هفته آخر انکوباسیون در تیمارهای ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری با شاهد تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) دارد و بیشترین قابلیت هدایت الکتریکی در هر دو خاک، در تیمار تلفیقی ۰/۵ درصد گوگرد عنصری و کود آلی (S+ES2+SM) مشاهده شد (شکل ۱). در خاک لومرسی بین قابلیت هدایت الکتریکی تیمار ساده گوگرد عنصری با سطح ۰/۲۵ درصد (S+ES1) و تیمار تلفیقی ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری و کود آلی (S+ES1+SM) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در خاک شنی لومی بین قابلیت هدایت الکتریکی تیمار ساده گوگرد عنصری با سطح ۰/۵ درصد (S+ES2) و تیمار تلفیقی ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری و کود آلی (S+ES1+SM) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و pH در پایان دوره انکوباسیون

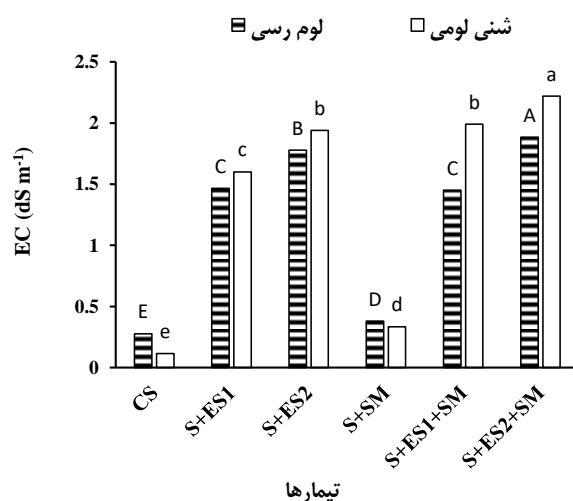
pH		قابلیت هدایت الکتریکی (EC)				منابع تغییر		
خاک شنی لومی		خاک لومرسی		خاک شنی لومی		خاک لومرسی		
میانگین	درجه	میانگین	درجه	میانگین	درجه	میانگین		
مربعات	آزادی	مربعات	آزادی	مربعات	آزادی	مربعات		
۰/۰۴۲ <sup>ns</sup>	۱	۰/۰۷۶ <sup>ns</sup>	۱	۰/۳۹ <sup>**</sup>	۱	۰/۰۱ <sup>**</sup>	۱	کود دامی (A)
۱/۲۰۲ <sup>ns</sup>	۲	۰/۲۰۱ <sup>ns</sup>	۲	۵/۹۹ <sup>**</sup>	۲	۳/۶۸ <sup>**</sup>	۲	گوگرد عنصری (B)
۰/۰۱۴ <sup>ns</sup>	۲	۰/۰۱۸ <sup>ns</sup>	۲	۰/۰۱۱ <sup>**</sup>	۲	۰/۰۷ <sup>**</sup>	۲	A*B
۰/۰۰۱	۱۲	۰/۰۰۲	۱۲	۰/۰۵	۱۲	۰/۰۳۴	۱۲	خطای آزمایش
۴/۸	-	۲/۳	-	۱۵	-	۱۸	-	ضریب تغییرات

\*\*\*، \* و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و غیر معنی‌دار

نتایج تحقیق نشان داد افزودن گوگرد و کود آلی به خاک‌ها باعث افزایش غلظت املاح محلول و شوری خاک شده است. افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در خاک‌های تیمار شده را می‌توان به املاح محلول موجود در کود آلی استفاده شده و همچنین حل شدن ترکیبات آهکی موجود در خاک، توسط اسید سولفوریک تولید شده در اثر فرایند اکسیداسیون میکروبی گوگرد نسبت داد (Sameni & Kasraian, 2004). در سایر مطالعات نیز افزایش قابلیت هدایت الکتریکی با افزودن گوگرد عنصری به خاک گزارش شده است (Pourbabae et al., 2020). در مطالعه بر روی خاک‌های آهکی مناطق مختلف استان کرمانشاه با مصرف ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد عنصری همراه با باکتری

تیوباسیلوس، افزایش ۰/۶۹ تا ۱ دسی زیمنس بر متر در هدایت الکتریکی خاک‌ها گزارش شده است (Ghaderi & Malakouti, 2018). در انتهای دوره انکوباسیون، pH خاک‌های لومرسی و شنی لومی شاهد، به ترتیب ۷/۷ و ۸/۵ به دست آمد. بجز تیمار ساده کود آلی (S+SM) در خاک لوم رسی (pH= ۷/۹)، کاهش جزئی در pH خاک‌های تیمار شده نسبت به pH خاک‌های شاهد مشاهده شد (شکل نمایش داده نشده است). دامنه تغییرات pH در خاک لومرسی تیمار شده (بجز تیمار ساده کود آلی) بین ۷/۴۷ تا ۷/۵۸ و در خاک شنی لومی تیمار شده بین ۸/۲۲ تا ۸/۳۰ به دست آمد. جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر pH در هفته آخر انکوباسیون را در هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر pH در هفته آخر انکوباسیون در هر دو خاک مورد بررسی، معنی‌دار نمی‌باشد و در هر دو خاک تیمار شده، در انتهای دوره انکوباسیون، بین pH خاک شاهد با خاک‌های تیمار شده تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. Ghaderi & Malakouti (2018) نیز در خاک‌های آهکی تیمار شده با ۱۰۰۰ کیلوگرم گوگرد عنصری همراه با باکتری تیوباسیلوس، کاهش ۰/۲۴ تا ۰/۶۲ واحدی در pH خاک‌ها را گزارش نمودند. Pourbabaee et al. (2020) نیز در بررسی اثر باکتری‌های اکسید کننده گوگرد و گوگرد عنصری بر pH، در هفته دوم بیشترین کاهش را در pH خاک‌های مورد مطالعه مشاهده نمودند و گزارش نمودند در هفته دوازدهم از انکوباسیون، pH خاک‌های تیمار شده به مقدار اولیه رسید و تغییرات آن جزئی بود. آنها دلیل این امر را ظرفیت بافری خاک بیان نمودند. کاهش جزئی در pH نشان دهنده کاهش بیشتر pH در جایگاه‌های میکروسکوپی محل فعالیت ریزجانداران است (Cifuentes & Lindemann, 1993) و از طرفی نشان می‌دهد، مقدار اسید تولید شده در اثر اکسیداسیون گوگرد، توان خنثی نمودن عوامل بافر کننده خاک‌های مورد مطالعه را نداشته است (Rogovska et al., 2007). خاصیت بافری pH خاک‌ها، عمدتاً توسط پروتونه و دپروتونه شدن گروه‌های اسیدی موجود در سطح مواد آلی و اکسیدها و هیدروکسیدها، انحلال و رسوب کربنات‌ها، تشکیل کمپلکس یون آلومینیوم با مواد آلی، تبادل یونی و انحلال کانی‌های رسی کنترل می‌شود (Bloom, 2000).

بر خلاف نتایج به دست آمده در این تحقیق در مطالعه انجام شده توسط Nadeem et al. (2022) بر روی خاک‌های آهکی تیمار شده با کود دامی، گوگرد عنصری و باکتری اکسید کننده گوگرد، بعد از ۶ هفته انکوباسیون pH خاک‌ها از ۸/۳ به ۶/۸ کاهش یافت. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه آن با سایر تحقیقات می‌توان عنوان نمود، در مطالعاتی با زمان انکوباسیون کوتاه‌تر، تغییرات کاهشی pH بیشتر بوده و با گذشت زمان به دلیل ظرفیت بافری خاک‌های آهکی، تغییرات pH خاک‌ها جزئی است.



خاک (S)، شاهد (CS)، تیمار دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2)

شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در خاک‌های شاهد و تیمار شده در انتهای دوره انکوباسیون (حروف بزرگ و کوچک به ترتیب مربوط به مقایسه میانگین‌ها در خاک‌های لومرسی و شنی لومی است). حروف متفاوت در هر خاک، نشان دهنده تفاوت معنی‌دار است.



**درصد کربنات کلسیم معادل و گچ خاک‌های شاهد و تیمار شده در انتهای دوره انکوباسیون**

در پایان دوره انکوباسیون درصد کربنات کلسیم معادل خاک‌های لومرسی و شنی لومی شاهد، به ترتیب ۱۵/۸ و ۱۴/۵ درصد و دامنه تغییرات آن در خاک لومرسی و شنی لومی تیمار شده به ترتیب، بین ۱۵/۶ تا ۱۶ درصد و ۱۴/۲۵ تا ۱۴/۵ درصد به دست آمد (شکل نمایش داده نشده است). جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر درصد کربنات کلسیم معادل در هفته آخر انکوباسیون را در هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر درصد کربنات کلسیم معادل در هفته آخر انکوباسیون در هر دو خاک مورد بررسی، معنی‌دار نمی‌باشد. با توجه به فرایند اکسیداسیون میکروبی گوگرد و تولید اسید سولفوریک، تغییرات جزئی در، درصد کربنات کلسیم معادل در خاک‌های مورد مطالعه احتمالاً به دلیل رسوب سولفات کلسیم در سطح کربنات کلسیم می‌باشد. در مطالعه‌ای گزارش شده است، مجاورت کلسیت با اسید سولفوریک، موجب تشکیل یک لایه از سولفات کلسیم در سطح کلسیت شده و باعث کاهش سرعت حلالیت کلسیت می‌شود (Booth *et al.*, 1997). بر خلاف درصد کربنات کلسیم معادل، در پایان دوره انکوباسیون درصد گچ در خاک‌های تیمار شده با گوگرد عنصری افزایش یافت. در هر دو بافت لومرسی و شنی لومی در مقایسه با خاک شاهد، بیش‌ترین افزایش در تیمار ساده گوگرد عنصری با سطح ۰/۵ درصد (S+ES2) مشاهده شد (شکل ۲).

**جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر درصد کربنات کلسیم معادل و گچ در پایان دوره انکوباسیون**

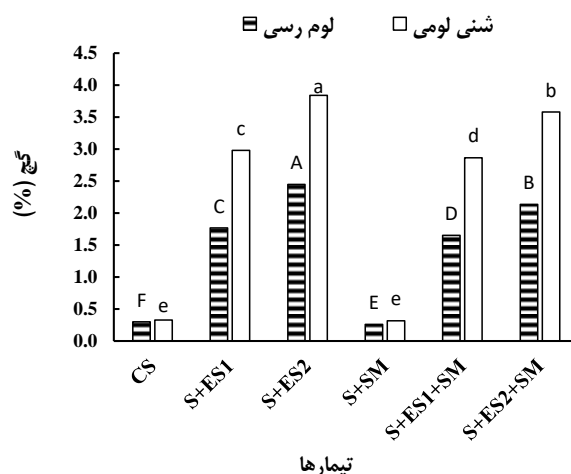
منابع تغییر		درصد کربنات کلسیم معادل				درصد گچ			
		خاک لومرسی		خاک شنی لومی		خاک لومرسی		خاک شنی لومی	
		درجه	میانگین	درجه	میانگین	درجه	میانگین	درجه	میانگین
		آزادی	مربعات	آزادی	مربعات	آزادی	مربعات	آزادی	مربعات
کود دامی (A)	۱	۰/۰۵۲ <sup>ns</sup>	۱	۰/۰۴۶ <sup>ns</sup>	۱	۰/۰۸ <sup>**</sup>	۱	۰/۱۱ <sup>**</sup>	۱
گوگرد عنصری (B)	۲	۰/۰۱۹ <sup>ns</sup>	۲	۰/۰۳۱ <sup>ns</sup>	۲	۱۸/۸۲ <sup>**</sup>	۲	۶/۴۴ <sup>**</sup>	۲
A*B	۲	۰/۳۹۳ <sup>ns</sup>	۲	۰/۰۹۱ <sup>ns</sup>	۲	۰/۰۳ <sup>*</sup>	۲	۰/۰۲ <sup>**</sup>	۲
خطای آزمایش	۱۲	۰/۳۸۵	۱۲	۰/۱۱۵	۱۲	۰/۰۴	۱۲	۰/۰۲	۱۲
ضریب تغییرات	-	۳/۶	-	۲	-	۱۴/۲	-	۱۰/۳	-

\*\*\*، \*\* و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و غیر معنی‌دار

از آنجایی که در خاک‌های آهکی یون کلسیم محلول و همچنین کمپلکس‌های معدنی (یون بی‌کربنات کلسیم) و آلی کلسیم در محلول خاک وجود دارد (Vedy, 1982)، احتمالاً افزایش درصد گچ در خاک‌های تیمار شده به دلیل واکنش یون‌های کلسیم موجود در محلول خاک با یون سولفات حاصل از اکسایش گوگرد در خاک می‌باشد. انحلال کربنات و بی‌کربنات‌های خاک (به ویژه کربنات‌های کلسیم و منیزیم که در خاک‌های آهکی فراوان هستند) در اثر اکسایش گوگرد در خاک و تولید اسید سولفوریک نیز باعث افزایش درصد گچ در خاک می‌شود (Cifuentes & Lindemann, 1993; Khadem *et al.*, 2014). در خاک‌های تیمار شده با کود آلی تغییر قابل ملاحظه‌ای در درصد گچ مشاهده نشد. درصد افزایش گچ در تیمارهای ساده گوگرد عنصری بیشتر از تیمارهای تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری به دست آمد. نتایج نشان داد حضور ماده آلی باعث کاهش تولید گچ در خاک‌ها شده است. در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است حضور ماده آلی باعث کاهش سرعت تشکیل بلورهای سولفات کلسیم می‌شود (Cao *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). دلیل این امر می‌تواند اتصال ترکیبات آلی به سطح بلورهای سولفات کلسیم و مسدود نمودن مکان‌های فعال جهت تشکیل و توسعه بلورهای سولفات کلسیم، تشکیل کمپلکس ترکیبات آلی با یون کلسیم در سطح گچ و در نتیجه افزایش حلالیت یون کلسیم و همچنین تغییر بار سطح کریستال‌های گچ و یا ایجاد نیروی دافعه در اثر اتصال ملکولهای آلی به سطح کریستال گچ باشد (Rabizadeh *et al.*, 2019; Turek *et al.*, 2017). جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر درصد گچ در هفته آخر انکوباسیون را در هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر درصد گچ در هفته آخر انکوباسیون در خاک لومرسی و شنی لومی، به ترتیب در سطح یک درصد و پنج درصد معنی‌دار است. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر درصد گچ در هفته آخر انکوباسیون نشان داد، در خاک لومرسی درصد گچ در هفته آخر انکوباسیون در تیمار ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری با شاهد تفاوت معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) دارد و در خاک شنی لومی نیز درصد



گچ در هفته آخر انکوباسیون، بجز تیمار ساده مواد آلی در سایر تیمارها با خاک شاهد تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) دارد (شکل ۲).



خاک (S)، شاهد (CS)، تیمار دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2)

شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر درصد گچ در خاک‌های شاهد و تیمار شده در انتهای دوره انکوباسیون (حروف بزرگ و کوچک به ترتیب مربوط به مقایسه میانگین‌ها در خاک‌های لوم‌رسی و شنی‌لومی است. حروف متفاوت در هر خاک، نشان دهنده تفاوت معنی‌دار است.)

#### اثر تیمارها بر اجزاء فسفر معدنی خاک‌های شاهد و تیمار شده در انتهای دوره انکوباسیون

قبل از شروع مطالعات انکوباسیون، ترتیب فراوانی اجزاء فسفر معدنی در خاک لوم‌رسی به صورت اکتاکلسیم فسفات (۵۰/۸۱٪) < آپاتیت (۲۹/۴۴٪) < فسفات آلومینیوم (۱۲/۰۳٪) < دی‌کلسیم فسفات (۴/۸۵٪) < فسفات محبوس شده (۱/۸٪) < فسفات آهن (۱/۰۸٪) به دست آمد. منظور از فسفات محبوس، یون فسفاتی است که به صورت فیزیکی توسط ترکیبات معدنی که در ساختار خود فاقد فسفر هستند، به دام افتاده است. معمولاً فسفر محبوس در ساختار اکسیدهای آهن، همتایت و گئوتیت یافت می‌شود (Smeck, 1985). در هفته آخر انکوباسیون (هفته دوازدهم) ترتیب فراوانی اجزاء فسفر معدنی در خاک‌های لوم‌رسی شاهد و تیمار شده با سطوح ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری به صورت اکتاکلسیم فسفات < آپاتیت < فسفات آلومینیوم < دی‌کلسیم فسفات < فسفات آهن < فسفات محبوس به دست آمد (جدول ۵). در هفته آخر انکوباسیون در مقایسه با خاک شاهد لوم‌رسی، در خاک‌های تیمار شده با سطوح ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری، جزء‌های دی‌کلسیم فسفات، فسفات آهن و فسفات محبوس شده افزایش و جزء‌های اکتاکلسیم فسفات و فسفات آلومینیوم کاهش یافت. جزء آپاتیت در تیمار ساده کود آلی و تیمار تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری، کاهش و در سایر تیمارها افزایش یافت.

در خاک شنی‌لومی قبل از شروع مطالعات انکوباسیون، ترتیب فراوانی اجزاء فسفر معدنی به صورت آپاتیت (۵۶/۲۰٪) < اکتاکلسیم فسفات (۳۳/۹۰٪) < فسفات آلومینیوم (۴/۶۴٪) < دی‌کلسیم فسفات (۲/۳۴٪) < فسفات آهن (۱/۸۱٪) < فسفات محبوس (۱/۰۹٪) به دست آمد. در هفته آخر انکوباسیون (هفته دوازدهم) نیز ترتیب فراوانی اجزاء فسفر معدنی در خاک شنی‌لومی شاهد و تیمار شده با سطوح ساده و تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی به صورت آپاتیت < اکتاکلسیم فسفات < دی‌کلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < فسفات آهن < فسفات محبوس به دست آمد (جدول ۵). در خاک لوم‌رسی در پایان دوره انکوباسیون، نسبت به شروع انکوباسیون درصد فسفر محبوس شده بیشتر از درصد فسفات آهن به دست آمد، اما در خاک شنی‌لومی این تغییر مشاهده نشد. احتمالاً دلیل این امر، به دام افتادن یون فسفات در ساختار ترکیبات آهن و آلومینیوم بی‌شکل در خاک لوم‌رسی باشد، که در مقایسه با خاک شنی‌لومی بیشتر است. در هفته آخر انکوباسیون در مقایسه با خاک شاهد شنی‌لومی، در خاک‌های تیمار شده با سطوح ساده و تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی، جزء‌های دی‌کلسیم فسفات، فسفات آلومینیوم و فسفات آهن و فسفات محبوس افزایش و جزء اکتاکلسیم فسفات کاهش یافت. همچنین جزء آپاتیت در تیمار ساده کود آلی و تیمار تلفیقی کود آلی با گوگرد عنصری کاهش و در سایر تیمارها افزایش یافت.

در بررسی توزیع شکل‌های معدنی فسفر در خاک‌های آهکی استان قزوین ترتیب فراوانی شکل‌های معدنی فسفر به صورت آپاتیت < اکتا کلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < فسفات آهن < فسفات محبوس < دی کلسیم فسفات گزارش شده است (Mostashari *et al.*, 2009). همچنین در بررسی توزیع شکل‌های معدنی فسفر در خاک‌های آهکی، بیشترین جزء موجود در خاک‌های مورد بررسی، جزء آپاتیت و سپس اکتاکلسیم فسفات گزارش شده است و پس از مصرف ۲۱ ساله کودهای فسفاته افزایش جزءهای اکتا کلسیم فسفات، فسفات آلومینیوم و دی کلسیم فسفات مشاهده شده است (Jun *et al.*, 2010). سایر مطالعات نیز جزءهای آپاتیت و سپس اکتا کلسیم فسفات را اجزاء غالب فسفر در خاک‌های آهکی گزارش نموده‌اند (Shen *et al.*, 2019). در مطالعه حاضر در خاک لومرسی شاهد و تیمار شده برخلاف خاک شنی لومی شاهد و تیمار شده، فراوانی جزء اکتا کلسیم فسفات بیشتر از جزء آپاتیت به دست آمد. از آنجایی که حلالیت جزء اکتا کلسیم فسفات بیشتر از جزء آپاتیت است، احتمالاً در خاک لومرسی فسفر خاک به شکل نسبتاً فراهم وجود دارد (Shen *et al.*, 2019) و حلالیت و فراهمی فسفر در در خاک لومرسی بیشتر از خاک شنی لومی است.

جدول ۵. مقادیر اجزای فسفر معدنی در خاک لومرسی و شنی لومی شاهد و تیمار شده در پایان دوره انکوباسیون

خاک	دی کلسیم فسفات	اکتاکلسیم فسفات	فسفات آلومینیوم	فسفات آهن	فسفات محبوس شده	آپاتیت	لومرسی	
							تیمار	شنی لومی
CS	۴/۹۹	۴۰/۹۴	۱۶/۰۴	۱/۴۵	*-	۳۶/۵۸	تیمار	CS
S+ES1	۴/۹۹	۳۸/۵۳	۱۴/۸۶	۱/۳۸	۰/۳۴	۳۹/۹۰	شنی لومی	S+ES1
S+ES2	۵/۸۷	۴۰/۱۱	۱۴/۲۳	۱/۸۵	-	۳۷/۹۳	تیمار	S+ES2
S+SM	۸/۲۳	۴۱/۷۰	۱۵/۲۱	۲/۲۸	۰/۳۵	۳۲/۲۴	شنی لومی	S+SM
S+ES1 +SM	۷/۹۲	۴۱/۰۷	۱۳/۶۵	۲/۴۳	۰/۶۵	۳۴/۲۸	تیمار	S+ES1 +SM
S+ES2 +SM	۷/۷۳	۳۸/۶۴	۱۴/۱۶	۳/۰۵	۰/۳۲	۳۶/۰۷	شنی لومی	S+ES2 +SM
CS	۲/۸۹	۲۶/۵۹	۵/۲۱	۰/۹۰	-	۶۴/۴۰	تیمار	CS
S+ES1	۳/۷۵	۲۳/۹۶	۵/۵۷	۰/۶۳	۰/۳۱	۶۵/۷۷	شنی لومی	S+ES1
S+ES2	۳/۹۷	۲۲/۰۵	۴/۸۲	۰/۹۵	۰/۶۳	۶۷/۵۸	تیمار	S+ES2
S+SM	۱۰/۷۷	۲۶/۵۴	۵/۲۲	۰/۷۶	۰/۳۰	۵۶/۴۱	شنی لومی	S+SM
S+ES1 +SM	۹/۰۴	۲۵/۰۶	۵/۸۰	۰/۹۹	-	۵۹/۱۲	تیمار	S+ES1 +SM
S+ES2 +SM	۹/۰۰	۳۴/۰۹	۶/۲۵	۱/۱۱	۰/۲۸	۵۹/۲۶	شنی لومی	S+ES2 +SM

خاک (S)، شاهد (CS)، تیمار دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2)

\*: غلظت کمتر از حد تشخیص دستگاه

به طور کلی در هر دو خاک مورد مطالعه، تیمارهای ساده و تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی باعث افزایش جزء دی کلسیم فسفات گردید. در هر دو بافت مورد مطالعه بیشترین افزایش در تیمار ساده کود آلی، سپس در تیمارهای تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی و در نهایت در تیمار ساده گوگرد عنصری مشاهده شد. همچنین در هر دو بافت مورد مطالعه، تیمارهای ساده و تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی باعث کاهش جزء اکتا کلسیم فسفات گردید. در هر دو بافت مورد مطالعه، بیشترین کاهش در تیمار ساده گوگرد عنصری، سپس در تیمارهای تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی و در نهایت در تیمار ساده کود آلی مشاهده شد. جزء دی کلسیم فسفات اشاره به ترکیب شیمیایی مونوکلسیم فسفات و دی کلسیم فسفات دارد و فسفر این دو ترکیب شیمیایی نسبت به سایر نمک‌های فسفات کلسیم دارای حلالیت بیشتری است و توسط گیاه قابل جذب می‌باشند (Havlin *et al.*, 2005). افزایش جزء دی کلسیم فسفات در خاک‌های تیمار شده، نشان دهنده اثر مثبت تیمارها بر افزایش غلظت فسفر فراهم در خاک‌ها می‌باشد. در بررسی اثر ماده آلی بر توزیع اجزاء معدنی فسفر در یک خاک آهکی لوم شنی، ۳/۲۴ درصد افزایش در مقدار فسفر قابل جذب خاک در اثر تیمار آلی گزارش شده است (Ahmad *et al.*, 2018). مطالعه اثر ماده آلی بر توزیع فسفر در یک خاک آهکی، توسط Song *et al.* (2017) افزایش جزءهای دی کلسیم فسفات و اکتا کلسیم فسفات گزارش شد.

در هر دو بافت مورد مطالعه تیمار ساده کود دامی و تیمارهای تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی باعث کاهش جزء آپاتیت در خاک‌ها شد. از آنجایی که حلالیت آپاتیت در خاک بسیار کم می‌باشد (Jiang & Gu, 1989) کاهش جزء آپاتیت نیز، نشان دهنده اثر مثبت تیمارها بر افزایش فراهمی فسفر در خاک‌ها می‌باشد. این امر را می‌توان به اسیدی شدن محیط خاک و حلالیت کانی‌های فسفات، در اثر تولید اسید سولفوریک حاصل از اکسیداسیون گوگرد عنصری (Sameni & Kasraian, 2004) و همچنین تولید اسیدهای آلی در اثر تجزیه ماده آلی و رقابت آنیون‌های آلی حاصل از تجزیه ماده آلی با یون فسفات برای جذب در مکان‌های جذبی و تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های مسئول در رسوب فسفر و در نتیجه کاهش ظرفیت تثبیت فسفر نسبت داد (Iyamuremye et al., 1996).

دلیل بیشتر بودن درصد جزء فسفات آلومینیوم در خاک لوم رسی شاهد و تیمار شده نسبت به خاک شنی لومی شاهد و تیمار شده (جدول ۵) را، می‌توان مقدار بیشتر آلومینیوم بی‌شکل در خاک لوم رسی دانست. سطح ویژه ترکیبات آمورف بیشتر از ترکیبات کریستالی است و جذب فسفر در خاک‌های حاوی اکسیدهای آهن و آلومینیوم آمورف، بیشتر از خاک‌های حاوی اکسیدهای آهن و آلومینیوم کریستالی است (Freese et al., 1992).

در هر دو خاک تیمار شده، درصد جزءهای فسفات آهن و فسفات محبوس شده در پایان دوره انکوباسیون افزایش یافت. ترکیب شیمیایی فسفات آهن نسبت به فسفات آلومینیوم دارای حلالیت کمتری است (Havlin et al., 2005). واکنش یون‌های فسفات حاصل از حلالیت سایر اجزاء و واکنش آن با ترکیبات شیمیایی آهن آمورف موجود در خاک می‌تواند دلیل افزایش این اجزاء در خاک‌های تیمار شده باشد.

#### اثر تیمارها بر تغییرات غلظت فسفر فراهم و سرعت تغییر شکل فسفر در طول دوره انکوباسیون

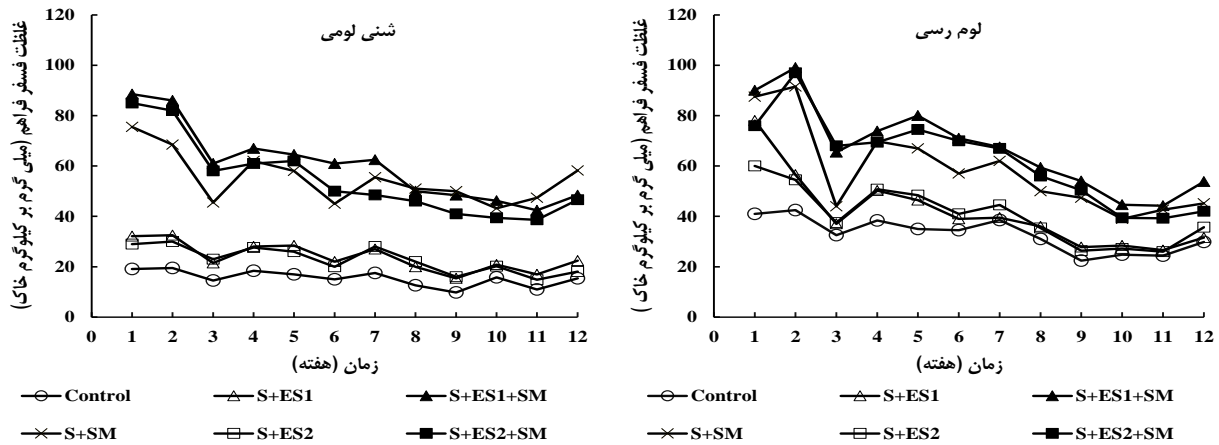
از آنجایی که در ابتدای آزمایش غلظت فسفر فراهم در خاک لوم رسی بیشتر بود، غلظت فسفر فراهم در طول دوره انکوباسیون نیز در این خاک، بیشتر از خاک شنی لومی به‌دست آمد (شکل ۳). تیمارهای ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری در ابتدا (هفته اول) و انتهای (هفته دوازدهم) دوره انکوباسیون، موجب افزایش غلظت فسفر فراهم در هر دو خاک تیمار شده گردید. مقدار این افزایش در خاک لوم رسی، در هفته اول بین ۱/۴۶ تا ۲/۳۱ برابر خاک شاهد و در هفته آخر بین ۱/۰۶ تا ۱/۰۸ برابر شاهد و در خاک شنی لومی در هفته اول بین ۱/۵۱ تا ۴/۶۳ برابر شاهد و در هفته آخر بین ۱/۱۷ تا ۳/۱۴ برابر شاهد به‌دست آمد. در هر دو خاک مورد مطالعه، در پایان دوره انکوباسیون غلظت فسفر فراهم در خاک‌های شاهد و تیمار شده کمتر از ابتدای دوره انکوباسیون به‌دست آمد. در هر دو خاک لوم رسی و شنی لومی تیمار شده، بین غلظت فسفر فراهم در انتهای دوره انکوباسیون و جزء دی‌کلسیم فسفات ( $t=0.83$ ,  $\alpha=0.01$ )، همبستگی مثبت و معنی‌دار به‌دست آمد.

بیش‌ترین غلظت فسفر فراهم در هفته آخر در خاک لوم رسی در تیمار تلفیقی ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری و کود آلی (S+ES1) و در خاک شنی لومی در تیمار ساده کود آلی (S+SM) مشاهده شد (شکل ۳). فراهمی فسفر در تیمارهای حاوی ۰/۵ درصد گوگرد، کمتر از تیمارهای حاوی ۰/۲۵ درصد گوگرد به دست آمد. دلیل این امر را می‌توان به تشکیل گچ نسبت داد. حضور گچ باعث کاهش فراهمی فسفر در خاک می‌شود (Murphy & Stevens, 2010). اسید سولفوریک تولید شده در اثر اکسیداسیون بیولوژیکی گوگرد توسط باکتریهای خاک، ضمن کاهش pH خاک موجب تشکیل گچ در خاک می‌شود.

در هر دو خاک مورد مطالعه، در تیمارهای تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری، غلظت فسفر فراهم بیشتر از تیمار ساده گوگرد عنصری به‌دست آمد. با توجه به نتایج شکل ۲، درصد گچ تشکیل شده در تیمارهای تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری، کمتر از تیمار ساده گوگرد عنصری است. حضور ماده آلی باعث کاهش سرعت تشکیل بلورهای گچ می‌شود (Cao et al., 2022). از جمله دلایل دیگر افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های تیمار شده با کود آلی می‌توان به فسفر حاصل از معدنی شدن فسفر آلی موجود در ساختار کود آلی و همچنین رقابت آنیون‌های آلی حاصل از تجزیه کود آلی با یون فسفات برای جذب در مکان‌های جذبی اشاره نمود (Havlin et al., 2005).

جدول ۶ پارامترهای حاصل از برازش تغییرات غلظت فسفر فراهم در طول دوره انکوباسیون (دوازده هفته) در خاک‌های لوم رسی و شنی لومی شاهد و تیمار شده را، بر تابع توانی نشان می‌دهد. در هر دو خاک لوم رسی و شنی لومی، کم‌ترین مقدار پارامتر  $a$  که نشان دهنده مقدار فسفر آزاد شده در شروع آزمایش است، در خاک‌های شاهد به ترتیب ۴۷/۱۰ و ۲۱/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد و بیش‌ترین مقدار پارامتر  $a$  در هر دو خاک، در تیمار تلفیقی ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری و کود آلی (S+ES1+SM) مشاهده شد. نتایج به دست آمده، بیانگر این مطلب است که در هر دو خاک مورد مطالعه، تیمار ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری فراهمی فسفر را در روز اول افزایش داده و در بین سطوح گوگرد عنصری، سطح ۰/۲۵ درصد در تیمار ساده و تلفیقی، فراهمی فسفر را بیش‌تر از سطح ۰/۵ درصد افزایش داده

است. در هفته آخر انکوباسیون نیز، فراهمی فسفر در تیمارهای ساده و تلفیقی حاوی ۰/۵ درصد گوگرد، کمتر از تیمارهای ساده و تلفیقی حاوی ۰/۲۵ درصد گوگرد به دست آمد (شکل ۳).



شکل ۳. تغییرات غلظت فسفر فراهم در خاک لوم رسی و شن لومی شاهد و تیمار شده در طول دوره انکوباسیون خاک (S)، شاهد (CS)، تیمار دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2)

سرعت تغییر شکل فسفر و کاهش فراهمی آن در خاک توسط ثابت  $b$  معادله توانی، تعیین شد. هر چه مقدار ضریب  $b$  (بدون در نظر گرفتن علامت منفی) بزرگتر باشد، نشان دهنده شرکت بیشتر فسفر در فرآیندهای شیمیایی مختلف از جمله جذب و رسوب است (Jalali, 2009). واکنش‌های جذب و رسوب از جمله عوامل موثر بر ابقاء و تثبیت فسفر در خاک‌ها می‌باشند. در هر دو خاک لوم رسی و شن لومی، کمترین مقدار ضریب  $b$  (بدون در نظر گرفتن علامت منفی) در خاک‌های شاهد مشاهده شد. با توجه به شکل ۳، در هر دو خاک مورد بررسی غلظت فسفر فراهم در طول دوره انکوباسیون در تیمار ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری، بیشتر از خاک شاهد بود، با این حال سرعت کاهش فراهمی فسفر در خاک‌های تیمار شده بیشتر از خاک‌های شاهد به دست آمد.

در خاک لوم رسی، مقدار ضریب  $b$  در تیمار ساده گوگرد عنصری (سطوح ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد) بیشتر از تیمار تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری به دست آمد. نتایج نشان داد که استفاده کود آلی همراه با گوگرد عنصری باعث کاهش سرعت تغییر شکل فسفر فراهم در خاک لوم رسی شده است. در خاک شن لومی بر خلاف خاک لوم رسی، تیمار تلفیقی کود آلی با گوگرد عنصری باعث افزایش سرعت تغییر شکل فسفر فراهم شده است. نتایج بررسی جزء بندی فسفر معدنی در خاک‌های مورد بررسی نشان داد، بر خلاف خاک لوم رسی، در خاک شن لومی در اثر تیمارهای ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری، درصد جزء فسفات آلومینیوم افزایش یافت و بیشترین افزایش در تیمار تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری مشاهده شد. افزایش مقدار ضریب  $b$  در تیمار تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی در خاک شن لومی را می‌توان به واکنش یون فسفات با ترکیبات آلومینیومی و تشکیل ترکیبات فسفات با حلالیت کم نسبت داد.

با توجه به جدول ۶، بجز تیمارهای تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری در خاک شن لومی، ضرایب  $b$  در خاک لوم رسی بیشتر از خاک شن لومی به دست آمد. مقدار آهن و آلومینیوم کریستاله در خاک شن لومی بیشتر از خاک لوم رسی است، مقدار آهن آمورف در هر دو خاک تقریباً برابر و درصد رس و مقدار آلومینیوم آمورف در خاک لوم رسی به ترتیب ۴/۷ و ۷ برابر خاک شن لومی است. مقدار رس، اکسیدهای آهن و آلومینیوم آمورف از جمله عوامل موثر در واکنش‌های فسفر در خاک است (Freese et al., 1992; Samadi & Gilkes, 1999) و احتمالاً فسفر در خاک لوم رسی نسبت به خاک شن لومی، بیشتر تحت تاثیر فرآیندهای شیمیایی قرار گرفته و سرعت واکنش فسفر با اجزاء خاک و شرکت آن واکنش‌های رسوب، و جذب در طول زمان بیشتر است. در مطالعه‌ای با هدف تاثیر ترکیبات آلی بر فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی، مقدار پارامتر  $a$  برای خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی مختلف به طور متوسط بین ۱۰۲/۸۴ - ۴۹/۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای خاک‌های تیمار شده با کود مرغی و کود دامی به ترتیب، ۱۳۷/۴۰ و ۱۴۶/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شد (Jalali, 2009). همچنین در این مطالعه، مقدار ضریب  $b$  در خاک‌های تیمار شده با انواع ترکیبات آلی، بین ۰/۱۴۹ تا ۰/۱۸۲۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر روز گزارش شده است.

جدول ۶. پارامترهای حاصل از برازش داده‌های فسفر فراهم آزاد شده از خاک‌های لومرسی و شنی لومی شاهد و تیمار شده در طول دوره انکوباسیون بر مدل توانی ( $q_t = at^b$ )

خاک شنی لومی			خاک لومرسی			تیمارها
r	b	a	r	b	a	
	mg kg <sup>-1</sup> week <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup> week <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	
۰/۵۷*	-۰/۰۹۸	۲۱/۱۶	۰/۶۶*	-۰/۱۱۲	۴۷/۱۰	CS
۰/۶۸*	-۰/۱۲۹	۳۶/۱۱	۰/۸۹**	-۰/۲۲۶	۸۴/۸۹	S+ES1
۰/۶۶*	-۰/۱۲۵	۳۴/۰۶	۰/۷۴**	-۰/۱۶۸	۶۹/۳۱	S+ES2
۰/۷۰**	-۰/۰۹۸	۷۵/۵۷	۰/۷۵**	-۰/۱۶۷	۹۹/۶۷	S+SM
۰/۸۶**	-۰/۱۶۱	۱۰۱/۸۰	۰/۷۶**	-۰/۱۵۳	۱۰۹/۰۲	S+ES1 +SM
۰/۸۸**	-۰/۱۸۴	۹۹/۲۲	۰/۶۵*	-۰/۱۵۴	۱۰۱/۳۲	S+ES2 +SM

خاک (S)، شاهد (CS)، تیمار دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2) \*\* و \* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد

جدول ۷ نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر غلظت فسفر فراهم در هفته آخر انکوباسیون را در هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر غلظت فسفر فراهم در هفته آخر انکوباسیون در هر دو خاک مورد بررسی، به ترتیب در سطح یک درصد و پنج درصد معنی‌دار است.

جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت فسفر فراهم در پایان دوره انکوباسیون

خاک شنی لومی		خاک لومرسی		منابع تغییر
میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	درجه آزادی	
۴۸۰۵/۲۷**	۱	۹۶۳/۶۰**	۱	کود دامی (A)
۳۴/۷۵*	۲	۴۳/۶۸**	۲	گوگرد عنصری (B)
۱۳۴/۹۱*	۲	۹۵/۴۶**	۲	A*B
۵/۳۲	۱۲	۰/۳۹	۱۲	خطای آزمایش
۱۹	-	۱۷/۶	-	ضریب تغییرات

\*\* و \* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد

مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود دامی و گوگرد عنصری بر غلظت فسفر فراهم در هفته آخر انکوباسیون نشان داد، در خاک لومرسی غلظت فسفر فراهم در هفته آخر انکوباسیون در تیمار ساده کود آلی (S+SM)، تیمار ساده ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2) و تیمار تلفیقی کود آلی با سطوح ۰/۲۵ (S+ES1+SM) و ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2+SM)، با شاهد تفاوت معنی‌داری ( $P < ۰/۰۱$ ) دارد و در خاک شنی لومی نیز مقدار فسفر فراهم در هفته آخر انکوباسیون در تیمار ساده کود آلی و تیمار تلفیقی کود آلی با سطوح ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد گوگرد عنصری، با شاهد تفاوت معنی‌داری ( $P < ۰/۰۵$ ) دارد (جدول ۸).

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح کود آلی و گوگرد عنصری بر غلظت فسفر فراهم در پایان دوره انکوباسیون (حروف کوچک و بزرگ به ترتیب مربوط به مقایسه میانگین‌ها در خاک‌های لومرسی و شنی لومی است. حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار است.)

تیمار	خاک لومرسی mg kg <sup>-1</sup>	خاک شنی لومی mg kg <sup>-1</sup>
CS	۲۹/۸ <sup>e</sup>	۱۵/۴ <sup>c</sup>
S+ES1	۳۱/۶ <sup>e</sup>	۲۲/۴ <sup>c</sup>
S+ES2	۳۵/۷ <sup>d</sup>	۱۸/۱ <sup>c</sup>
S+SM	۴۵/۲ <sup>b</sup>	۵۸/۲ <sup>a</sup>
S+ES1 +SM	۵۳/۸ <sup>a</sup>	۴۸/۴ <sup>b</sup>
S+ES2 +SM	۴۲/۰ <sup>c</sup>	۴۶/۶ <sup>b</sup>

خاک (S)، شاهد (CS)، تیمار دو درصد کود آلی (S+SM)، تیمار ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES1)، تیمار ۰/۵ درصد گوگرد عنصری (S+ES2)

## نتیجه گیری

در بررسی توزیع و فراهمی فسفر در دو خاک آهکی با بافت و مقدار آهن و آلومینیوم کل متفاوت، تیمار شده با کود گوسفندی (کود آلی) و گوگرد عنصری به همراه باکتری تیوباسیلوس در طی دوازده هفته در شرایط انکوباسیون، در انتهای دوره انکوباسیون به دلیل خاصیت بافری، اثر تیمارهای ساده و تلفیقی کود دامی و گوگرد عنصری بر pH هر دو خاک آهکی مورد مطالعه جزئی بود. تغییرات درصد کربنات کلسیم معادل نیز در هر دو خاک لوم رسی و شنی لومی تیمار شده، احتمالاً به دلیل رسوب لایه‌ای از سولفات کلسیم در سطح کلسیت، کم بود. در حالیکه قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و در صد گچ در هر دو خاک تیمار شده نسبت به خاک شاهد، به دلیل انحلال املاح کربناته و بی‌کربناته خاک در اثر اسید سولفوریک حاصل از اکسایش گوگرد و واکنش یون‌های کلسیم موجود در محلول خاک با یون سولفات حاصل از اکسایش گوگرد افزایش یافت. درصد افزایش گچ خاک‌ها در تیمار ساده گوگرد عنصری بیشتر از تیمار تلفیقی گوگرد عنصری و کود آلی به‌دست آمد.

نتایج نشان داد حضور ماده آلی در هر دو خاک مورد مطالعه، باعث کاهش تولید گچ در خاک‌ها شده است. در انتهای دوره انکوباسیون نیز فراهمی فسفر در تیمارهای تلفیقی بیشتر از تیمارهای ساده و در تیمار تلفیقی کود آلی با ۰/۲۵ درصد گوگرد عنصری بیشتر از تیمار تلفیقی کود آلی با ۰/۵ درصد گوگرد عنصری به‌دست آمد. مصرف کود آلی به تنهایی و یا همراه با سطوح مختلف گوگرد عنصری در کاهش جزء آپاتیت در هر دو خاک مورد مطالعه، موثر بود و مصرف سطوح مختلف گوگرد عنصری به تنهایی در خاک‌ها، باعث افزایش جزء آپاتیت شد. در هر دو خاک، تیمارهای ساده و تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری موجب افزایش جزء دی‌کلسیم فسفات و کاهش جزء اکتاکلسیم فسفات شد. در خاک شنی لومی بر خلاف خاک لوم‌رسی، تیمارهای ساده و تلفیقی باعث افزایش جزء فسفات آلومینیوم شد.

تیمار تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری در خاک لوم‌رسی، موجب کاهش سرعت تغییر شکل فسفر و در خاک شنی لومی، موجب افزایش سرعت تغییر شکل فسفر شد. در خاک لومی رسی تیمار شده با سطوح ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد گوگرد عنصری، افزودن کود آلی، باعث کاهش سرعت تغییر شکل فسفر (ضریب  $b$  معادله توانی)، به ترتیب از ۰/۲۲۶ به ۰/۱۵۳ و از ۰/۱۶۸ به ۰/۱۵۴ میلی گرم بر کیلوگرم در هفته شد. در خاک شنی لومی سرعت تغییر شکل فسفر، به ترتیب از ۰/۱۲۹ به ۰/۱۶۱ و از ۰/۱۲۵ به ۰/۱۸۴ میلی گرم بر کیلوگرم در هفته افزایش یافت. افزایش سرعت تغییر شکل فسفر در تیمار تلفیقی کود آلی و گوگرد عنصری در خاک شنی لومی احتمالاً در اثر تشکیل جزء شیمیایی فسفات آلومینیوم به دلیل درصد بالای آهن و آلومینیوم کل در این خاک نسبت به خاک لوم‌رسی است.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت کاربرد کود آلی همراه با گوگرد عنصری در هر دو خاک لوم‌رسی و شنی لومی مورد مطالعه، با افزایش جزء حلالتر دی کلسیم فسفات و کاهش جزء‌های کم محلول اکتاکلسیم فسفات و آپاتیت و همچنین کاهش تشکیل گچ، موجب افزایش فراهمی فسفر شد. کانی گچ اثر نامطلوب در ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها داشته و باعث کاهش فراهمی فسفر در خاک می‌شود. از آنجایی که گچ غالباً در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک یافت می‌شود، لذا جهت افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی لوم‌رسی و شنی لومی مورد مطالعه، استفاده تلفیقی از ۰/۲۵ گوگرد عنصری همراه با دو درصد ترکیب آلی توصیه می‌شود. همچنین نتایج نشان داد با وجود سرعت تغییر شکل فسفر بالا در خاک شنی لومی به دلیل درصد بالای آهن و آلومینیوم کل، ماده آلی باعث افزایش فراهمی فسفر در این خاک شد.

## سپاس‌گزاری

این مقاله حاصل کار پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه ملایر است. بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاس خود را از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه ملایر اعلام می‌دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCE

- Ahmad, M., Ahmad, M., El-Naggar, A. H., Usman, A. R., Abduljabbar, A., Vithanage, M., Elfaki, J., Abdulelah, A.-F., & Al-Wabel, M. I. (2018). Aging effects of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil. *Pedosphere*, 28, 873-883.
- Allison, L., & Moodie, C. (1965). Carbonate. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 1379-1396.

- Aria, M. M., Lakzian, A., Haghnia, G. H., Berenji, A. R., Besharati, H., & Fotovat, A. (2010). Effect of Thiobacillus, sulfur, vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. *Bioresource Technology*, 101, 551-554.
- Bloom, P. R. (2000). Soil pH pH buffering. *Handbook of soil science*, B333-B352.
- Booth, J., Hong, Q., Compton, R. G., Prout, K., & Payne, R. M. (1997). Gypsum overgrowths passivate calcite to acid attack. *Journal of colloid and interface science*, 192, 207-214.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54, 464-465.
- Cao, T., Rolf, J., Wang, Z., Violet, C., & Elimelech, M. (2022). Distinct impacts of natural organic matter and colloidal particles on gypsum crystallization. *Water Research*, 218, 118500.
- Chadwick, D. R., John, F., Pain, B. F., Chambers, B. J., & Williams, J. (2000). Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *The Journal of Agricultural Science*, 134(2), 159-168.
- Cifuentes, F., & Lindemann, W. (1993). Organic matter stimulation of elemental sulfur oxidation in a calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 727-731.
- Dehghan, R., Shariatmadari, H., & Khademi, H. (2008). Soil Phosphorus Forms in Four Toposequences of Isfahan and Shahrekord Regions. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 11, 463-472. (In Persian)
- Freese, D., Van der Zee, S., & Van Riemsdijk, W. (1992). Comparison of different models for phosphate sorption as a function of the iron and aluminium oxides of soils. *Journal of Soil Science*, 43, 729-738.
- Ghaderi, J., & Malakouti, M. J. (2018). Effect of elemental sulfur and Thiobacillus bacteria on some chemical properties of soil and nutrients uptake by maize (*Zea mays* L.) crop. *Applied Soil Research*, 6, 131-142. (In Persian)
- Goldstein, A. H., Baertlein, D. A., & McDaniel, R. G. (1988). Phosphate starvation inducible metabolism in *Lycopersicon esculentum*: I. Excretion of acid phosphatase by tomato plants and suspension-cultured cells. *Plant physiology*, 87, 711-715.
- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S., & Nelson, W. (2005). *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hitsuda, K., Yamada, M., & Klepker, D. (2005). Sulfur requirement of eight crops at early stages of growth. *Agronomy Journal*, 97, 155-159.
- Hopkins, B., & Ellsworth, J. (2005). Phosphorus availability with alkaline/calcareous soil. In "Western Nutrient Management Conference", Vol. 6, pp. 83-93. University of Idaho Idaho Falls, ID.
- Iyamuremye, F., Dick, R., & Baham, J. (1996). Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption. *Soil Science*, 161, 426-435.
- Jalali, M. (2009). Phosphorus availability as influenced by organic residues in five calcareous soils. *Compost science & utilization*, 17, 241-246.
- Jiang, B., & Gu, Y. (1989). A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*, 20, 159-165.
- Jones, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. Boca Raton: CRC press.
- Jun, W., Wen-Zhao, L., Han-Feng, M., & Ting-Hui, D. (2010). Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application. *Pedosphere*, 20, 304-310.
- Kamali, B., Mahdavi, A., & Sotoodehnia, A. (2020). The Effect of Soil Parameters on Phosphorous Adsorption Coefficients in Heavy Soils of Different Areas of Qazvin Plain. *Water and Soil*, 34, 471-483. (In Persian)
- Kamprath, E., & Watson, M. (1980). Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. *The role of phosphorus in agriculture*, 433-469.
- Kaya, M., Küçükyumuk, Z., & Erdal, I. (2009). Effects of elemental sulfur and sulfur-containing waste on nutrient concentrations and growth of bean and corn plants grown on a calcareous soil. *African Journal of Biotechnology*, 8.
- 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, 2-11. (In Persian)
- Khavazi, K., Jahandideh Mahjan Abadi, V. A., and 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, 23-41. (In Persian)
- Koocheki, A., & Kamali, G. (2010). Climate Change and Rainfed Wheat Production in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8, 508-520. (In Persian)
- Malakouti, M., Keshavarz, P., & Karimian, N. (2008). *A Comprehensive Approach towards Identification of Nutrient Deficiencies and Optimal Fertilization for Sustainable Agriculture*. 7th/Ed. Tehran, Iran: Tarbiat





Modares University Publication. (In Persian)

- Malekzadeh, T., Besharati, H., & Savaghebi, G. (2016). Effects of sulfur and Thiobacillus bacteria application on some nutrients availability in soils with different buffering capacities. *Journal of Soil Biology*, 3, 187-202. (In Persian)
- Mehra, O., & Jackson, M. (2013). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In "Clays and clay minerals", pp. 317-327. Elsevier.
- Mostashari, M., Muazardalan, M., Karimian, N., Hosseini, H. M., & Rezai, H. (2009). Phosphorus fractions of selected calcareous soils of Qazvin province and their relationships with soil characteristics. *Iranian Journal of Soil Research*, 23(1), 11-22. (In Persian)
- Michael, P. S., Fitzpatrick, R. W., & Reid, R. J. (2017). Effects of live wetland plant macrophytes on acidification, redox potential and sulphate content in acid sulphate soils. *Soil Use and Management*, 33(3), 471-481.
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27, 31-36.
- Murphy, P. N., & Stevens, R. (2010). Lime and gypsum as source measures to decrease phosphorus loss from soils to water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 212, 101-111.
- Nadeem, S. M., Hanif, A., Khan, M. Y., Waqas, M. R., Ahmad, Z., Ashraf, M. R., & Naveed, M. (2022). Elemental sulphur with sulphur oxidizing bacteria enhances phosphorus availability and improves growth and yield of wheat in calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-9.
- Nelson, D. a., & Sommers, L. E. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- Odongo, N. E., Hyoungho, K., Choi, H.-c., Van Straaten, P., McBride, B. W., & Romney, D. L. (2007). Improving rock phosphate availability through feeding, mixing and processing with composting manure. *Bioresource Technology*, 98, 2911-2918.
- Olsen, S. R. (1954). "Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate," US Department of Agriculture.
- Pashapour, S., & Moradi, N. (2020). Effect of different sources of sulfur on distribution of inorganic phosphorus forms in a calcareous soil. *Applied Soil Research*, 8, 55-67.
- Pourbabae, A. A., Koohbori Dinekaboodi, S., Seyed Hosseini, H. M., Alikhani, H. A., & Emami, S. (2020). Potential application of selected sulfur-oxidizing bacteria and different sources of sulfur in plant growth promotion under different moisture conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51, 735-745.
- Rabizadeh, T., Morgan, D. J., Peacock, C. L., & Benning, L. G. (2019). Effectiveness of green additives vs poly (acrylic acid) in inhibiting calcium sulfate dihydrate crystallization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 1561-1569.
- Rhoades, J. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Soil Science*, 78(2), 2-154.
- Rogovska, N. P., Blackmer, A. M., and Mallarino, A. P. (2007). Relationships between soybean yield, soil pH, and soil carbonate concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1251-1256.
- Safaa, M. M., Khaled, S., & Hanan, S. (2013). Effect of elemental sulphur on solubility of soil nutrients and soil heavy metals and their uptake by maize plants. *The Journal of American Science*, 9, 19-24.
- Samadi, A., & Gilkes, R. (1999). Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of southern Western Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 809-815.
- Sameni, A., & Kasraian, A. (2004). Effect of agricultural sulfur on characteristics of different calcareous soils from dry regions of Iran. I. Disintegration rate of agricultural sulfur and its effects on chemical properties of the soils. *Communications in soil science and plant analysis*, 35, 1219-1234.
- Saying, M., Mermut, A., & Tiessen, H. (1990). Phosphate sorption-desorption characteristics by magnetically separated soil fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1298-1304.
- Seyyedi, S. M., Rezvani Moghaddam, P., Khajeh Hossieni, M., & Shahandeh, H. (2020). Effect of Calcareous Soil Amendments on Quantitative and Qualitative Yields of Black Seed (*Nigella sativa* L.). *Journal Of Agroecology*, 11, 1437-1448. (In Persian)
- Shen, Y., Duan, Y., McLaughlin, N., Huang, S., Guo, D., & Xu, M. (2019). Phosphorus desorption from calcareous soils with different initial Olsen-P levels and relation to phosphate fractions. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 2997-3007.
- Smeck, N. E. (1985). Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, 36, 185-199.

- Song, K., Xue, Y., Zheng, X., Lv, W., Qiao, H., Qin, Q., & Yang, J. (2017). Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil. *Scientific reports*, 7, 1-9.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods* (Vol. 14). John Wiley & Sons.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, the Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. 5, 475-490.
- Turek, M., Mitko, K., Piotrowski, K., Dydo, P., Laskowska, E., & Jakóbk-Kolon, A. (2017). Prospects for high water recovery membrane desalination. *Desalination*, 401, 180-189.
- Vedy, J. (1982). Soil solution: Composition and pedogenic significance. *Constituents and properties of soils*.
- Wang, P., Cheng, W., Zhang, X., Liu, Q., Li, J., Ma, J., & Zhang, T. (2022). Membrane Scaling and Wetting in Membrane Distillation: Mitigation Roles Played by Humic Substances. *Environmental Science & Technology*, 56, 3258-3266.
- Wang, Y., Li, Q., Hui, W., Shi, J., Lin, Q., Chen, X., & Chen, Y. (2008). Effect of sulphur on soil Cu/Zn availability and microbial community composition. *Journal of hazardous materials*, 159, 385-389.
- Zamil, S. S., Quazi, Q. F., MAH, C. D., & Al Wahid, A. (2004). Effects of different animal manures on yield quality and nutrient uptake by Mustard CV. Agrani. *BRAC University Journal*, 1(2), 59-66.
- Zheng, Z., Parent, L., & MacLeod, J. (2003). Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. *Canadian journal of soil science*, 83, 395-403.