

## ارتباط حلالیت فسفر خاک و جذب نیتروژن و تأثیر آن بر شاخص برداشت فسفر سیاهدانه

سیدمحمد سیدی<sup>۱</sup>، محمد خواجه حسینی<sup>۲\*</sup>، پرویز رضوانی مقدم<sup>۳</sup> و حمید شاهنده<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۳. دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، دانشیار و استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۴. استاد گروه علوم خاک و گیاه دانشگاه تکراس آمریکا

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶)

### چکیده

به منظور بررسی برخی راهکارها برای افزایش حلالیت فسفر در خاک‌های آهکی و تأثیر بر جذب فسفر و نیتروژن، کارایی جذب و شاخص برداشت فسفر سیاهدانه (*Nigella sativa* L.)، آزمایشی در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. این مطالعه به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دوازده تیمار و سه تکرار طراحی شد. منابع اصلاح‌کننده خاک آهکی شامل ورمی کمپوست (V) + باکتری تیوباسیلوس (T)، گوگرد (S) + T و S+V+T همراه با شاهد به عنوان عامل اول، و سه سطح کاربرد فسفر (صفر، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار از منبع فسفات دی‌آمونوم)، به عنوان عامل دوم آزمایش بودند. براساس نتایج آزمایش، هر سه منبع اصلاح‌کننده خاک آهکی (شامل S+T، V+T و S+V+T) تأثیر معنی‌داری در افزایش فسفر قابل جذب خاک، جذب فسفر و نیتروژن توسط بوته و شاخص برداشت فسفر داشتند. همچنین کاربرد S+V+T و S+T در مقایسه با شاهد، به کاهش pH خاک به ترتیب تا ۰/۹۴ و ۰/۶۱ واحد منجر شد. بین غلظت فسفر و غلظت نیتروژن در بوته سیاهدانه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت؛ با وجود این، بین عملکرد دانه و کارایی جذب فسفر، همبستگی منفی و معنی‌داری مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** کارایی جذب فسفر، کارایی مصرف فسفر، واکنش خاک.

### مقدمه

قابل جذب خاک، کارایی مصرف زیاد فسفر اغلب تحت تأثیر کارایی جذب بوده و در شرایط عدم محدودیت این عنصر، افزایش کارایی مصرف فسفر بیشتر وابسته به کارایی فیزیولوژیک است.

خصوصیات خاک از مهم‌ترین عوامل در جذب فسفر از خاک است. در خاک‌های آهکی و قلیایی مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، فسفر قابل جذب برای گیاه ممکن است تحت تأثیر کربنات کلسیم و تبدیل به فسفات کلسیم، به شکل غیرقابل جذب برای گیاه تبدیل شود (Sameni & Kasraian, 2004; Hopkins & Ellsworth, 2005; Khorassani, 2010). از این رو، کارایی

کارایی مصرف فسفر نشان‌دهنده توانایی گیاه در استفاده از فسفر موجود در خاک و تولید ماده خشک است (Shenoy & Kalagudi, 2005). در مرحله رسیدگی، کارایی جذب فسفر (میزان فسفر زیست‌توده به فسفر قابل جذب خاک) و کارایی فیزیولوژیک فسفر (عملکرد به‌ازای هر واحد فسفر زیست‌توده) به عنوان اجزای کارایی مصرف یا زراعی فسفر (عملکرد به‌ازای هر واحد فسفر قابل جذب خاک) در نظر گرفته می‌شوند (Manske et al., 2002; Shenoy & Kalagudi, 2005; Fageria & Barbosa Filho, 2007). در شرایط محدودیت فسفر

کمبود ماده آلی در خاک نیز از مشکلات مهم در سیستم‌های زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Shirani *et al.*, 2011). از این رو، در کنار اکسایش بیولوژیکی گوگرد، افزایش فراهمی عناصر غذایی از منابع آلی (Arcand *et al.*, 2010; Possinger *et al.*, 2013) مانند ورمی‌کمپوست (Mohammady Aria *et al.*, 2010) نیز می‌تواند در بهبود ساختار خاک و افزایش جذب فسفر مؤثر باشد. همچنین در طی فرایند تجزیه کودهای آلی در خاک، تولید اسید کربنیک حاصل از واکنش دی‌اکسید کربن با آب و نیز تولید برخی اسیدهای آلی مانند اسید اگزالیک و تارتاریک می‌تواند به کاهش موضعی pH خاک آهکی و در نهایت افزایش تبدیل فسفر از شکل نامحلول آن به صورت قابل جذب منجر شود (Foroughifar & Poor-Kasmani, 2002; Biswas *et al.*, 2006).

بر اساس توضیحات ذکر شده، این آزمایش با هدف مطالعه برخی منابع اصلاح‌کننده خاک آهکی بر مقدار جذب فسفر و نیتروژن توسط سیاهدانه، عملکرد دانه و نیز کارایی جذب، کارایی مصرف و شاخص برداشت فسفر سیاهدانه انجام گرفت. به منظور شناخت بهتر واکنش شاخص‌های کارایی فسفر در سیاهدانه، تغییرات مقدار فسفر قابل جذب، هدایت الکتریکی و pH خاک در طی مراحل گلدهی و برداشت سیاهدانه نیز بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و دوازده تیمار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد (با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا) اجرا شد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش مقدماتی در گلخانه (Seyyedi *et al.*, 2013)، منابع اصلاح‌کننده خاک آهکی شامل ورمی‌کمپوست + باکتری تیوباسیلوس (V+T)، گوگرد + باکتری تیوباسیلوس (S+T) و ورمی‌کمپوست + گوگرد + باکتری تیوباسیلوس (S+V+T) همراه با شاهد و سه سطح کاربرد فسفر (صفر، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار از

مصرف فسفر در خاک‌های آهکی یا قلیایی اغلب به توانایی گیاه در جذب فسفر از خاک و در نتیجه کارایی جذب آن وابسته است (Korkmaz *et al.*, 2009).

سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) از خانواده آلاله (Ranunculaceae)، گیاهی دارویی است که در مناطق نیمه‌خشک نواحی غرب آسیا مانند ایران کشت می‌شود (D'Antuono *et al.*, 2002; Ghamarnia *et al.*, 2010). از آنجا که کمبود فسفر و نیز جذب پایین آن به‌ویژه در خاک‌های قلیایی، از محدودیت‌های اصلی در سیستم‌های زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است (Sameni & Kasraian, 2004)، و نیز با توجه به اهمیت ویژه فسفر در تولید سیاهدانه (El-Deen & Ahmed, 1997; Mohamed *et al.*, 2000; Tuncturk *et al.*, 2011)، کمبود و جذب کم فسفر ممکن است از جمله مشکلات مهم در راستای تولید سیاهدانه باشد.

در خاک‌های آهکی مناطق خشک یا نیمه‌خشک، اکسیداسیون بیولوژیکی گوگرد و تولید اسید سولفوریک توسط باکتری‌های جنس *تیوباسیلوس*، راهکاری برای کاهش موضعی pH خاک، انحلال فسفات کلسیم و در نهایت افزایش حلالیت فسفر و جذب آن توسط گیاه در نظر گرفته می‌شود (Foroughifar & Poor-Kasmani, 2002; Kariminia & Shabanpour, 2002; Korkmaz *et al.*, 2009). Lipman *et al.* (1916) و Waksman & Joffe (1922) از اولین محققانی بودند که نقش مؤثر اکسیداسیون گوگرد را در افزایش فسفر قابل جذب خاک گزارش کردند. Salimpour *et al.* (2010) نیز اظهار داشتند که باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد در خاک‌های آهکی می‌توانند در افزایش جذب فسفر و عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) مؤثر باشند. علاوه بر این، به دلیل همبستگی مثبت بین کاربرد گوگرد و جذب نیتروژن (Salvagiotti *et al.*, 2009) و نیز بین جذب فسفر و نیتروژن (Duan, 2004)، اکسیداسیون بیولوژیک گوگرد و در نتیجه حلالیت بیشتر فسفر در خاک‌های آهکی، می‌تواند جذب هر چه بیشتر نیتروژن را امکان‌پذیر کند. علاوه بر این افزایش جذب فسفر می‌تواند در نهایت به بهبود شاخص برداشت فسفر در گیاه منجر شود که خود عامل مهمی در بهبود عملکرد گیاه به‌شمار می‌رود (Singh *et al.*, 2005).

اجرای آزمایش به صورت آیش بود. برخی خصوصیات این خاک در جدول ۱ آورده شده است. در اواخر اسفند ۱۳۹۱، مراحل آماده سازی زمین شامل شخم اولیه و ثانویه، تسطیح و ایجاد جوی وپشته انجام گرفت و سپس کرت های آزمایش با ابعاد ۲×۳ متر (۶ مترمربع) ایجاد شد. فاصله کرت ها و پشته ها از یکدیگر ۰/۵ و فاصله بلوک ها ۱ متر انتخاب شد.

منبع فسفات دی آمونیوم<sup>۱</sup> دارای ۲۰ درصد فسفر خالص یا ۴۶ درصد  $P_2O_5$  به ترتیب عامل اول و دوم آزمایش انتخاب شدند. به دلیل ماهیت متفاوت منابع اصلاح کننده خاک (V)، S و T)، مقدار استفاده از این منابع در هر سطح کاربرد منفرد آنها مساوی با کاربرد تلفیقی آنها بود. زمین مورد نظر (دارای خاک آهکی) در سال قبل از

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و ورمی کمپوست استفاده شده در آزمایش

نمونه مورد مطالعه	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	pH	کربنات کلسیم (%)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	فسفر کل (%)	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	کربن آلی (درصد)	گوگرد کل (میلی گرم در کیلوگرم)
خاک مزرعه	۴۸/۴۶	۳۱/۹۵	۱۹/۵۹	۸/۳۹	۱۱/۱۷	۰/۷۵	۰/۰۵۶	۱۰/۵۹	۰/۲۳	۹/۳۱
ورمی کمپوست	-	-	-	۸/۲۴	-	۸/۱۵	۱/۱۳	-	۱۸/۹۴	-

عملیات کاشت سیاهدانه (توده سمیرم اصفهان) در ۲۶ اسفند ۱۳۹۱ در طرفین پشته ها انجام گرفت. گیاهچه های سیاهدانه در مرحله چهاربرگی برای رسیدن به تراکم مورد نظر (۲۰۰ بوته در متر مربع) تنک شدند. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و سایر آبیاری ها هفته ای یک بار تا زمان رسیدگی فیزیولوژیک انجام گرفت. همچنین از هیچ گونه علف کش و آفت کش در طی فصل رشد استفاده نشد.

در مرحله گلدهی، شاخص های خاک شامل اسیدیته خاک (دستگاه pH meter- METROHM، مدل ۶۳۲)، هدایت الکتریکی (دستگاه Ec meter- JENWAY، مدل ۴۳۱۰) و فسفر قابل جذب یا فسفر اولسن (دستگاه Spectrophotometer-JENWAY، مدل ۴۵۱۰) تعیین شد (Olsen et al., 1954). همچنین مقدار فسفر (دستگاه Spectrophotometer, JENWAY، مدل ۴۵۱۰) و نیتروژن (دستگاه Kjeldahl- PECO، مدل 55 psu) در بوته اندازه گیری شد.

عملیات برداشت با زرد شدن بوته ها و فولیکول ها در هفتم مرداد ۱۳۹۲ انجام گرفت و براساس آن عملکرد دانه و بیولوژیک با رعایت اثر حاشیه اندازه گیری شد. علاوه بر شاخص های ذکر شده در مرحله گلدهی، کارایی جذب فسفر، کارایی مصرف فسفر و شاخص برداشت فسفر سیاهدانه براساس معادلات ۱ تا ۳ تعیین شد (Manske et al., 2002; Singh et al., 2005; Salvagiotti et al., 2009

براساس سطح کربنات کلسیم خاک و pH و نیز کربن آلی اندک آن، ورمی کمپوست به مقدار ۰/۵ درصد وزن خاک (معادل ۱۰ تن ورمی کمپوست در هکتار) و کود گوگرد به صورت گوگرد عنصری میکرونیزه نیز به مقدار ۱ درصد وزن خاک (۲۰ تن گوگرد در هکتار) در یک مرحله قبل از کاشت استفاده شد (Sibbet, 1995; Mohammady Aria et al., 2010). همراه با کاربرد گوگرد، باکتری تیوباسیلوس<sup>۲</sup> تهیه شده از مؤسسه زیستی مهر آسیا نیز در کرت های مورد نظر مصرف شد. کود فسفات آمونیوم، به دلیل دارا بودن ماهیت اسیدی در خاک و به عنوان کود فسفر توصیه شده در خاک های آهکی یا قلیایی (Mazaheri & Majnon, 2007) مطرح است. بر این اساس کود فسفات دی آمونیوم نیز در یک مرحله قبل از کاشت استفاده شد. فسفر و در نتیجه متفاوت بودن مقدار نیتروژن مصرف شده در کرت ها، به سطوح صفر، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار، به ترتیب ۵۴، ۲۷ و صفر کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص (به صورت اوره) اعمال شد تا به تمامی کرت ها نیتروژن مساوی داده شود. علاوه بر این، نیتروژن در مراحل چهار تا شش برگی (تنک کردن) و پیش از گلدهی (Javadi, 2008)، به مقدار هر مرحله ۳۰ کیلوگرم در هکتار در تمامی کرت ها مصرف شد.

1.  $(NH_4)_2HPO_4$  (Diammonium Phosphate), 46%  $P_2O_5$  (20% P)  
2. *Thiobacillus thiooxidans*

ضمن کاهش pH خاک و در نتیجه حلالیت بیشتر فسفر، به افزایش نسبی هدایت الکتریکی خاک منجر می‌شود (Foroughifar & Poor-Kasmani, 2002; Sameni & Kasraian, 2004; Heydarnezhad *et al.*, 2012). کاهش pH خاک و افزایش حلالیت فسفر خاک تحت تأثیر کاربرد گوگرد توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است (Lopez-Aguirre *et al.*, 1999; Mohammady Aria *et al.*, 2010). به‌طور کلی، پیش از کاربرد اصلاح‌کننده‌های گوگردی در خاک‌های آهکی، هدایت الکتریکی اولیه خاک و سطح خسارت شوری در گیاه باید در نظر گرفته شود. البته به‌دلیل آنکه آستانه شوری برای کاهش رشد و عملکرد سیاهدانه، دو دسی‌زیمنس بر متر تعیین شده است (Ghamarnia *et al.*, 2012)، به‌نظر می‌رسد اکسیداسیون گوگرد و افزایش نسبی هدایت الکتریکی خاک در این آزمایش (تا حدود ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر) تأثیر منفی بر رشد و عملکرد سیاهدانه نداشته است.

بر اساس نتایج جدول ۳، با افزایش سطوح کود فسفر (۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار) مقدار فسفر قابل جذب خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۳). همچنین طبق کاهش pH خاک، کاربرد منابع اصلاح‌کننده خاک نقش مؤثری در افزایش معنی‌دار مقدار فسفر قابل جذب داشت؛ به‌طوری که در نتیجه کاربرد S+T و S+V+T در مقایسه با شاهد، مقدار فسفر قابل جذب خاک به‌ترتیب تا ۸/۳۷ و ۱۶/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت (جدول ۳). در این زمینه Soaud *et al.* (2012) نیز کاهش معنی‌دار pH و افزایش مقدار فسفر قابل جذب را در نتیجه کاربرد گوگرد عنصری در ۳۲ روز پس از شروع آزمایش گزارش کردند. علاوه بر اکسیداسیون گوگرد در افزایش حلالیت فسفر خاک آهکی، نقش مؤثر کاربرد ورمی‌کمپوست به‌عنوان منبع آلی فسفر در این خاک می‌تواند به‌دلیل دارا بودن مقدار زیاد فسفر (جدول ۱)، تأمین کربن و انرژی برای فعالیت بیشتر باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد (Mohammady Aria *et al.*, 2010)، تولید گاز کربنیک (Foroughifar & Poor-Kasmani, 2002) و برخی اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک و اسید اگزالیک در طی فرایند تجزیه کود (Biswas & Narayanasamy, 2006) باشد که به کاهش موضعی pH خاک ناحیه ریزوسفر و افزایش جذب فسفر منجر می‌شود.

$$(1) \quad \text{مقدار فسفر زیست‌توده} = \frac{\text{کارایی جذب فسفر (درصد)}}{\text{مقدار فسفر قابل جذب خاک در متر مربع}} \times 100$$

$$(2) \quad \text{عملکرد دانه در مترمربع} = \frac{\text{مقدار فسفر قابل جذب فسفر (گرم بذر بر گرم فسفر قابل جذب در خاک)}}{\text{کارایی مصرف یا زراعی}} \times 100$$

$$(2) \quad \text{مقدار فسفر زیست‌توده (بوته)} = \frac{\text{مقدار فسفر زیست‌توده (بوته)}}{\text{شاخص برداشت فسفر (درصد)}} \times 100$$

در مرحله رسیدگی، مقدار فسفر بوته یا زیست‌توده (دانه + کاه) در اندام‌های هوایی اندازه‌گیری شد. فسفر قابل جذب خاک نیز براساس وزن مخصوص ظاهری خاک (به‌طور جداگانه در هر کرت) در عمق ۳۰ سانتی‌متری توسعه ریشه تعیین شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت. میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) و در سطح احتمال ۵ درصد مورد مقایسه آماری قرار گرفتند.

## نتایج و بحث

شاخص‌های مورد مطالعه خاک در مرحله گلدهی سیاهدانه نتایج حاصل از تأثیرات منابع اصلاح‌کننده خاک و سطوح کاربرد فسفر بر شاخص‌های مورد مطالعه خاک در جدول ۲ آمده است. با وجود بی‌تأثیر بودن سطوح کود فسفر بر pH و هدایت الکتریکی خاک، اثر منابع اصلاح‌کننده خاک بر شاخص‌های ذکر شده معنی‌دار بود (جدول ۲). هر سه منبع اصلاح‌کننده (شامل S+T، V+T و S+V+T) در مقایسه با شاهد تأثیر معنی‌داری در کاهش pH و نیز افزایش هدایت الکتریکی خاک داشتند (جدول ۳)؛ به‌طوری که کاربرد S+T و S+V+T در مقایسه با شاهد، به کاهش pH به‌ترتیب تا ۰/۹۴ و ۰/۶۱ واحد و افزایش هدایت الکتریکی خاک به‌ترتیب تا ۶۳۱ و ۴۰۳ میکروزیمنس بر متر منجر شد (جدول ۳). تغییرات ذکر شده در خاک می‌تواند تحت تأثیر کاربرد گوگرد و اکسیداسیون بیولوژیکی آن باشد که به تولید اسید سولفوریک منجر می‌شود. اسید سولفوریک در واکنش با کربنات کلسیم به گچ یا سولفات کلسیم تبدیل می‌شود که

جدول ۲. تجزیه واریانس برخی شاخص‌های مورد مطالعه خاک مزرعه سیاهدانه در مرحله گله‌دهی

منابع تغییر	درجه آزادی	اسیدیته خاک	هدایت الکتریکی خاک	فسفر اولسن	غلظت فسفر بوته	جذب فسفر توسط بوته	غلظت نیتروژن بوته	جذب نیتروژن توسط بوته
بلوک	۲	۰/۰۲ <sup>ns</sup>	۳۹۷۱۷/۵۳*	۲/۷۷ <sup>ns</sup>	۰/۰۲ <sup>ns</sup>	۰/۰۸ <sup>ns</sup>	۱/۱۹ <sup>ns</sup>	۰/۰۲ <sup>ns</sup>
منابع اصلاح کننده خاک	۳	۱/۴۴**	۶۸۴۲۲۴/۷۷**	۴۴۴/۶۴**	۲/۵۳**	۱۵/۳۶**	۳/۳۵*	۸۶/۶۸**
مقدار فسفر	۲	۰/۰۰۳ <sup>ns</sup>	۹۸۳۴/۱۱ <sup>ns</sup>	۷۲/۶۳**	۰/۱۴**	۱/۵۲**	۵/۶۶**	۲۰/۵۷**
منابع اصلاح کننده خاک × مقدار فسفر	۶	۰/۰۰۳ <sup>ns</sup>	۸۴۶۰/۶۳ <sup>ns</sup>	۴/۸۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۴ <sup>ns</sup>	۰/۲۴*	۰/۲۲ <sup>ns</sup>	۱/۶۲ <sup>ns</sup>
خطا	۲۲	۰/۰۱	۱۷۵۵۲/۷۴	۲/۸۴	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۶۶	۰/۹۴

\*، \*\* و ns به ترتیب معنی داری در سطح ۵ درصد، ۱ درصد و عدم اختلاف معنی دار.

جدول ۳. تأثیرات ساده مقدار فسفر و منابع اصلاح کننده خاک بر شاخص‌های مورد مطالعه خاک و سیاهدانه در مرحله گله‌دهی

منابع اصلاح کننده خاک	مقدار فسفر (کیلوگرم در هکتار)	اسیدیته خاک	هدایت الکتریکی خاک (میکروزیمنس بر متر)	فسفر اولسن (میلی گرم بر کیلوگرم)	غلظت فسفر بوته (گرم بر کیلوگرم)	جذب فسفر توسط بوته (گرم در متر مربع)	غلظت نیتروژن بوته (گرم بر کیلوگرم)	جذب نیتروژن توسط بوته (گرم در متر مربع)
شاهد	-	۸/۴۶	۷۶۰/۳۳	۱۰/۳۲	۲/۲۷	۱/۲۳	۸/۲۷	۴/۵۶
V+T*	-	۸/۱۳	۸۸۴/۴۴	۲۲/۹۶	۳/۲۷	۳/۴۵	۹/۰۷	۹/۶۰
S+T	-	۷/۵۲	۱۳۹۱/۳۳	۱۸/۶۹	۲/۷۱	۲/۲۰	۹/۱۰	۷/۴۱
V+S+T	-	۷/۸۵	۱۱۶۲/۸۹	۲۶/۶۷	۳/۴۳	۴/۱۸	۹/۷۶	۱۱/۸۷
LSD = 0.05		۱/۱۰	۱۲۹/۵۲	۱/۶۵	۰/۱۳	۰/۲۹	۰/۸۰	۰/۹۵
-	صفر	۷/۹۷	۱۰۵۸/۴۲	۱۶/۹۶	۲/۸۰	۲/۳۷	۸/۲۷	۶/۸۹
-	۳۰	۷/۹۹	۱۰۲۵/۲۵	۲۰/۲۳	۲/۹۵	۲/۸۶	۹/۳۳	۸/۸۰
-	۶۰	۸/۰۱	۱۰۸۲/۲۵	۲۱/۷۷	۳/۰۱	۳/۰۶	۹/۵۵	۹/۳۹
LSD = ۰/۰۵		۰/۰۹	۱۱۲/۱۷	۱/۴۳	۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۶۹	۰/۸۲

\* S: گوگرد، T: باکتری تیوباسیلوس، V: ورمی کمپوست.

از نظر وجود کربنات کلسیم) در تثبیت بخشی از فسفر موجود در کود شیمیایی است (جدول ۱)، نقش مؤثر واکنش اکسیداسیون گوگرد در تعدیل pH و افزایش فسفر قابل جذب را خاطر نشان می‌سازد (Soaud et al., 2012). برتری معنی‌دار تیمار V+S+T در مقایسه با V+T و S+T از نظر جذب فسفر (جدول ۲) نیز می‌تواند نشان‌دهنده کاربرد مؤثر کودهای آلی و گوگردی به صورت تلفیقی در افزایش هرچه بیشتر فسفر بوته در مقایسه با کاربرد جداگانه آنها باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده، بین مقدار فسفر قابل جذب خاک با غلظت فسفر و نیتروژن در بوته سیاهدانه همبستگی مثبت و معنی‌داری به دست آمد (شکل ۱- الف و ب). همچنین بین هر چهار شاخص غلظت و مقدار فسفر و نیز غلظت و مقدار نیتروژن در بوته سیاهدانه همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد (شکل ۲- الف تا د). در

شاخص‌های مورد مطالعه سیاهدانه در مرحله گله‌دهی مشابه افزایش مقدار فسفر قابل جذب خاک در نتیجه منابع اصلاح کننده خاک، غلظت و مقدار جذب فسفر بوته سیاهدانه در مرحله گله‌دهی نیز در نتیجه منابع اصلاح کننده خاک (شامل S+T، V+T و S+V+T) رو به افزایش گذاشت (جدول‌های ۲ و ۳). در شرایط عدم کاربرد فسفر، کاربرد S+T و V+S+T در مقایسه با شاهد، به ترتیب به افزایش ۲/۲ و ۵ برابری جذب فسفر در بوته منجر شد (جدول ۴). نکته جالب آنکه در شرایط عدم مصرف کود فسفر، مقدار فسفر بوته در نتیجه تیمار S+T (۱/۸۴ گرم در متر مربع) ضمن آنکه تفاوت معنی‌داری با کاربرد ۶۰ کیلوگرم در هکتار (۱/۵۶ گرم در متر مربع) نداشت، به طور معنی‌دار بیش از کاربرد ۳۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (۱/۳۲ گرم در متر مربع) بود (جدول ۴). این نتایج ضمن آنکه نشان‌دهنده پتانسیل به نسبت زیاد خاک مورد آزمایش

مقدار نیتروژن بیشتری را از خاک جذب کند. Salvagiotti *et al.* (2009) نیز نقش مؤثر کاربرد گوگرد در افزایش جذب نیتروژن در گندم را مشاهده کردند.

#### شاخص‌های مورد مطالعه خاک در مرحله رسیدگی سیاهدانه

مشابه مرحله گلدھی، در مرحله رسیدگی نیز منابع اصلاح‌کننده خاک تأثیر معنی‌داری بر pH، هدایت الکتریکی و فسفر قابل جذب داشتند (جدول ۵). بیشترین تأثیر در کاهش pH و افزایش هدایت الکتریکی در نتیجه کاربرد تیمار S+T مشاهده شد. همچنین بیشترین افزایش فسفر قابل جذب خاک در نتیجه کاربرد تیمار V+S+T به دست آمد (جدول ۶).

در انتهای دوره رشد، کاهش pH خاک در نتیجه منابع اصلاحی خاک می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که کاربرد گوگرد به‌ویژه در کنار مصرف کودهای آلی در ابتدای فصل رشد و اکسیداسیون بیولوژیکی آن می‌تواند سبب تعدیل pH خاک آهکی و جذب متعادل فسفر در سراسر دوره رشد سیاهدانه (حدود چهار ماه) شود. به‌طور کلی، ظرفیت بافیری زیاد خاک از نظر مقدار آهک می‌تواند در طی زمان مجدداً به تغییر pH و برگشت آن به حالت اولیه منجر شود (Sibbet, 1995). از این‌رو، به‌منظور بهبود درازمدت شرایط حاکم بر خاک آهکی، اعمال منابع اصلاح‌کننده باید به‌طور پایدار انجام گیرد (Sameni & Kasraian, 2004).

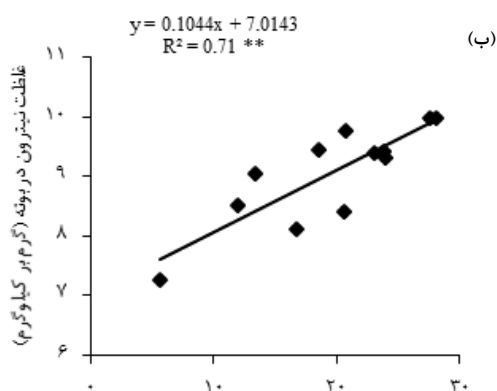
این زمینه Duan *et al.* (2004) نیز همبستگی مثبت بین جذب فسفر و نیتروژن در گندم بهاره را مشاهده کردند.

جدول ۴. تأثیرات متقابل مقدار فسفر و منابع اصلاح‌کننده خاک بر شاخص‌های مورد مطالعه خاک و سیاهدانه در مرحله گلدھی

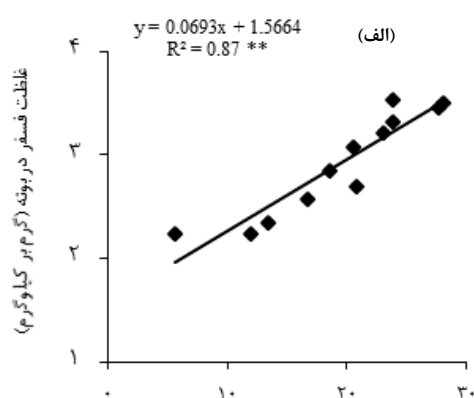
مقدار فسفر (کیلوگرم در هکتار)	منابع اصلاح‌کننده خاک (گرم در متر مربع)	شاهد
۰	V+T*	۰/۸۳
۰	S+T	۲/۶۸
۰	V+S+T	۱/۸۴
۳۰	V+S+T	۴/۱۳
۳۰	شاهد	۱/۳۲
۳۰	V+T	۳/۵۷
۳۰	S+T	۲/۳۸
۳۰	V+S+T	۴/۱۷
۶۰	شاهد	۱/۵۶
۶۰	V+T	۴/۰۹
۶۰	S+T	۲/۳۸
۶۰	V+S+T	۴/۲۳
LSD = ۰/۰۵		۰/۵۰

\*S: گوگرد، T: باکتری نیوباسیلوس، V: ورمی‌کمپوست.

همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $R^2=0.43^{**}$ ) بین غلظت فسفر و نیتروژن در بوته (شکل ۱-ب) می‌تواند نشان‌دهنده این موضوع باشد که کاربرد تیمارهای اصلاح‌کننده و کاهش موضعی pH خاک ناحیه ریزوسفر، ضمن افزایش حلالیت فسفر خاک و بهبود جذب این عنصر، این توانایی را برای سیاهدانه فراهم می‌کند تا

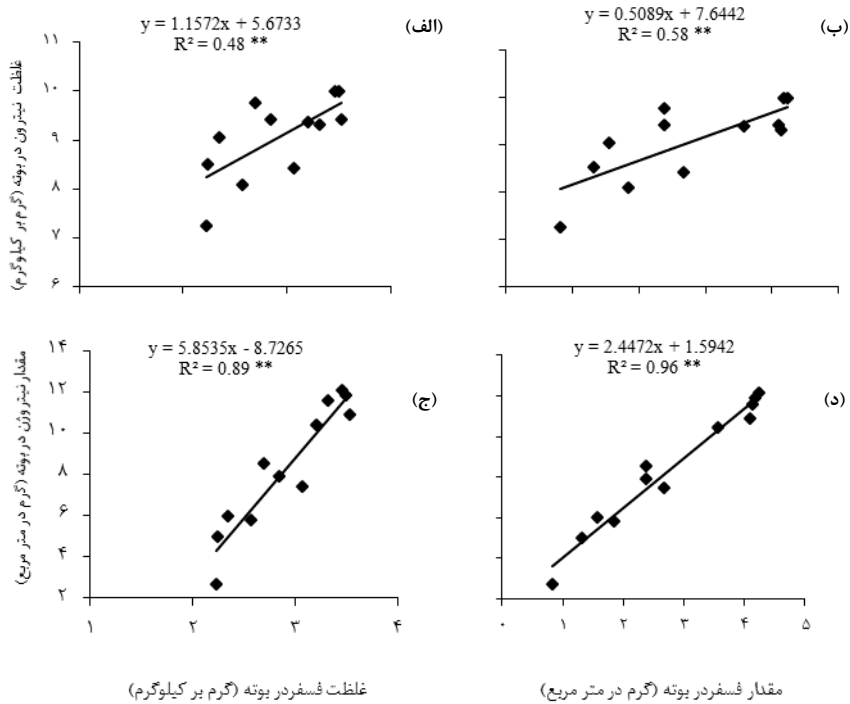


فسفر قابل جذب خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)



فسفر قابل جذب خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

شکل ۱. ارتباط بین فسفر قابل جذب خاک با غلظت فسفر (الف) و نیتروژن در بوته (ب) سیاهدانه



شکل ۲. ارتباط بین غلظت و مقدار جذب فسفر و نیتروژن در بوته سیاهدانه در مرحله گلدی

جدول ۵. تجزیه واریانس برخی شاخص‌های مورد مطالعه خاک مزرعه سیاهدانه در مرحله رسیدگی

منابع تغییر	درجه آزادی	اسیدیته خاک	هدایت الکتریکی خاک	فسفر اولسن	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	غلظت فسفر بذر	غلظت شاخص فسفر بوته	کارایی جذب فسفر	کارایی مصرف فسفر
بلوک	۲	۰/۰۳ ns	۴۹۷۰/۱۹ ns	۰/۴۵ ns	۶۸/۵۳ ns	۱۰۳/۵۰ ns	۰/۸۲ ns	۰/۱۶ ns	۱/۰۰ ns	۱/۱۲ ns
منابع اصلاح‌کننده خاک	۳	۱/۲۴ **	۵۰۴۳۵۵/۶۶ **	۴۰۰/۷۸ **	۲۱۵/۵۷ **	۱۳۲۴/۷۴ *	۸/۸۴ **	۱/۲۱ **	۶/۰۱ *	۴۶/۹۵ **
مقدار فسفر	۲	۰/۰۰۷ ns	۱۳۰۲۳/۴۴ ns	۶۶/۴۱ **	۳۱۹۵/۴۸ **	۲۲۷۰۰/۲۹ **	۹/۴۷ **	۱/۵۵ **	۰/۹۷ ns	۲۷/۳۴ **
منابع اصلاح‌کننده خاک × مقدار فسفر	۶	۰/۰۰۷ ns	۲۹۵۰/۳۰ ns	۲/۷۱ ns	۹۰/۶۱ ns	۷۳۰/۴۳ ns	۰/۸۰ ns	۰/۲۳ *	۲/۰۶ ns	۱۷/۴۳ **
خطا	۲۲	۰/۰۰۷	۷۴۶۶/۹۲	۱/۷۵	۲۴/۵۲	۳۲۸/۲۷	۰/۴۵	۰/۰۶	۱/۲۹	۰/۷۴

ns و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ۱ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار.

جدول ۶. تأثیرات ساده مقدار فسفر و منابع اصلاح‌کننده خاک بر شاخص‌های مورد مطالعه سیاهدانه در مرحله رسیدگی

منابع اصلاح‌کننده خاک	مقدار فسفر (کیلوگرم در هکتار)	اسیدیته خاک	هدایت الکتریکی خاک (میکروزیمنس بر متر)	فسفر اولسن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	عملکرد دانه (گرم در متر مربع)	عملکرد بیولوژیک (گرم در متر مربع)	غلظت فسفر بذر (گرم بر کیلوگرم)	غلظت شاخص فسفر بوته (گرم بر کیلوگرم)	کارایی جذب فسفر (درصد)	کارایی مصرف فسفر (گرم بذر بر گرم فسفر خاک)
شاهد	-	۸/۴۵	۸۱۲/۷۸	۹/۵۶	۵۲/۳۴	۱۴۸/۳۰	۵/۳۹	۳/۰۹	۱۱/۴۹	۱۳/۹۲
V+T *	-	۸/۱۴	۹۱۴/۸۹	۲۰/۹۱	۸۵/۴۸	۲۳۵/۵۹	۷/۲۱	۳/۷۸	۹/۹۹	۹/۶۰
S+T	-	۷/۶۰	۱۳۱۶/۰۰	۱۷/۸۸	۷۴/۶۷	۲۱۰/۰۸	۶/۸۰	۳/۶۷	۱۰/۰۵	۹/۷۵
V+S+T	-	۷/۸۳	۱۲۰۲/۸۹	۲۵/۳۹	۹۶/۳۴	۲۶۶/۶۷	۷/۶۹	۳/۹۳	۹/۶۵	۸/۹۰
LSD = ۰/۰۵	-	۰/۰۸	۸۴/۴۸	۱/۲۹	۴/۸۴	۱۷/۷۱	۰/۶۶	۰/۲۵	۳/۴۶	۰/۸۴
صفر	-	۸/۰۲	۱۰۸۴/۷۵	۱۵/۷۹	۷۲/۷۵	۲۰۵/۸۸	۵/۸۰	۳/۲۳	۱۰/۵۷	۱۲/۲۷
۳۰	-	۸/۰۱	۱۰۲۳/۹۲	۱۹/۲۳	۷۷/۸۰	۲۱۳/۰۳	۶/۹۶	۳/۷۰	۱۰/۰۰	۹/۹۲
۶۰	-	۷/۹۸	۱۰۷۶/۲۵	۲۰/۲۹	۸۱/۱۸	۲۲۶/۵۷	۷/۵۴	۳/۹۳	۱۰/۰۲	۹/۴۵
LSD = ۰/۰۵	-	۰/۰۷	۷۳/۱۶	۱/۱۲	۴/۱۹	۱۵/۳۴	۰/۵۷	۰/۲۱	۰/۹۶	۰/۷۳

\* S: گوگرد، T: باکتری نیوباسیلوس، V: ورمی‌کمپوست.

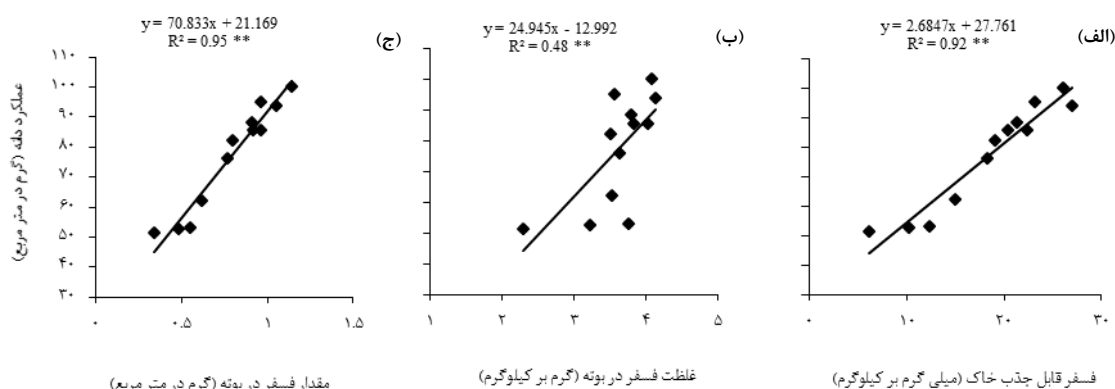
و رقابت آنها با یون‌های فسفات جذب‌شده در سطوح ذرات خاک، به کاهش موضعی pH و افزایش حلالیت و بازیابی فسفر نامحلول در خاک منجر شود.

با افزایش سطوح کاربرد فسفر، عملکرد دانه و بیولوژیک سیاهدانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۶). مشابه این نتایج، *Tuncturk et al.* (2011) افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و بیولوژیک سیاهدانه را در نتیجه افزایش سطوح کاربرد فسفر گزارش کردند. *Mohamed et al.* (2000) نیز به نقش مؤثر فراهمی فسفر در بهبود عملکرد دانه سیاهدانه اشاره کردند.

مشابه مرحله گلدھی، منابع اصلاح‌کننده خاک، در زمان برداشت نیز نقش معنی‌داری در افزایش غلظت و جذب فسفر در بوته داشتند. در بین منابع ذکرشده، کاربرد تلفیقی منابع (V+S+T) در مقایسه با کاربرد جداگانه آنها نقش بیشتری در افزایش معنی‌دار غلظت و مقدار جذب فسفر داشت. همچنین در شرایط عدم کاربرد فسفر، کاربرد S+T و V+S+T در مقایسه با شاهد، به افزایش غلظت فسفر بوته به ترتیب تا ۵۴/۲ و ۵۵/۹ درصد منجر شد (جدول ۷). نتایج به‌دست‌آمده ضمن آنکه نشان‌دهنده نقش ویژه فسفر در بهبود عملکرد سیاهدانه است، اهمیت مواد آلی و به‌ویژه واکنش اکسیداسیون را در افزایش حلالیت و فراهمی فسفر در خاک و در نتیجه بهبود عملکرد دانه سیاهدانه خاطر نشان می‌کند. همبستگی مثبت بین عملکرد دانه با فسفر قابل جذب خاک (شکل ۳-الف)، غلظت فسفر بوته (شکل ۳-ب) و مقدار فسفر بوته (شکل ۳-ج) می‌تواند توجیهی در این زمینه باشد.

شاخص‌های مورد مطالعه سیاهدانه در مرحله رسیدگی برپایه نتایج به‌دست‌آمده، اثر منابع اصلاح‌کننده خاک و سطوح کاربرد فسفر بر عملکرد دانه و بیولوژیک سیاهدانه معنی‌دار بود (جدول ۵). هر سه منبع اصلاح‌کننده خاک (شامل S+T، V+T و S+V+T) در مقایسه با شاهد سبب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و بیولوژیک سیاهدانه شدند (جدول ۶). همچنین در بین منابع ذکرشده، کاربرد تلفیقی منابع (V+S+T) تأثیر بیشتری در افزایش شاخص‌های ذکرشده داشت (جدول ۶). در این زمینه *Mosavi Nik* (2012) افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک گیاه دارویی اسفرزه (*Plantago ovata L.*) را در نتیجه کاربرد گوگرد در خاک آهکی مشاهده کرد.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، به‌دلیل ماهیت آهکی و قلیایی خاک در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، کاهش حلالیت و کمبود فسفر در خاک از جمله مشکلات مهم در سیستم‌های زراعی این مناطق به‌شمار می‌رود ( *Sameni & Kasraian, 2004; Adhami et al., 2006*). از این‌رو، افزایش حلالیت فسفر براساس واکنش اکسایش گوگرد ( *Vidyalakshmi et al., 2009; Ullah et al., 2013*) و نیز با مصرف نهاده‌های آلی مانند ورمی‌کمپوست ( *Mohammady Aria et al., 2010*) می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد گیاه داشته باشد. *Zolfi Bavariani & Nouruzi* (2010) اظهار داشتند که در خاک آهکی، مصرف کود آلی، ضمن افزایش فسفر خاک، می‌تواند از طریق فرایندهایی مانند تولید اسیدهای آلی یا معدنی و همچنین تولید آنیون‌های آلی



شکل ۳. ارتباط بین عملکرد دانه با فسفر قابل جذب خاک (الف)، غلظت فسفر بوته (ب) و مقدار فسفر بوته،

(ج) سیاهدانه در مرحله رسیدگی



جدول ۷. تأثیرات متقابل مقدار فسفر و منابع اصلاح‌کننده خاک بر

شاخص‌های مورد مطالعه سیاهدانه در مرحله رسیدگی

مقدار فسفر (کیلوگرم در هکتار)	منابع اصلاح‌کننده خاک	غلظت فسفر بوته (گرم بر کیلوگرم)	کارایی مصرف فسفر (گرم بذر بر گرم فسفر خاک)
	شاهد	۲/۲۹	۱۹/۶۴
صفر	* V+T	۳/۵۱	۱۰/۰۹
	S+T	۳/۵۳	۹/۷۱
	V+S+T	۳/۵۷	۹/۶۱
۳۰	شاهد	۳/۲۳	۱۲/۱۱
	V+T	۳/۸۰	۹/۷۶
	S+T	۳/۶۳	۹/۶۹
	V+S+T	۴/۱۴	۸/۱۲
۶۰	شاهد	۳/۷۶	۱۰/۰۲
	V+T	۴/۰۳	۸/۹۴
	S+T	۳/۸۴	۹/۸۶
	V+S+T	۴/۰۸	۸/۹۷
LSD = ۰/۰۵		۰/۴۲	۱/۴۶

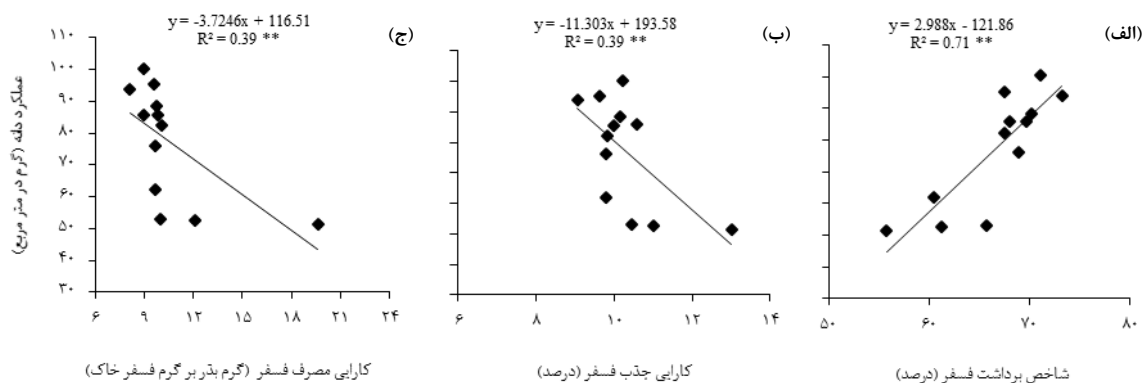
\* S: گوگرد، T: باکتری تیوباسیلوس، V: ورمی کمپوست.

کاهش کارایی جذب و مصرف فسفر منجر شد که البته کاهش کارایی جذب از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۶). برای مثال، کارایی مصرف فسفر در تیمار شاهد (۱۹/۶۴ گرم بذر بر گرم فسفر خاک) تا دو برابر بیش از کارایی مصرف فسفر در تیمار ۶۰ کیلوگرم فسفر در هکتار همراه با S+V+T بود (۸/۹۷ گرم بذر بر گرم فسفر خاک).

به‌ازای هر واحد افزایش شاخص برداشت فسفر، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۴- الف). با وجود این، بین کارایی جذب و یا مصرف فسفر با عملکرد دانه همبستگی منفی و معنی‌داری وجود داشت (شکل ۴- ب و ج).

در کنار جذب فسفر، افزایش سطوح کاربرد فسفر (۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار) تأثیر معنی‌داری در بهبود شاخص برداشت فسفر در سیاهدانه داشت (جدول ۶). همچنین هر سه منبع اصلاح‌کننده خاک (شامل S+T، V+T و S+V+T) موجب افزایش شاخص برداشت فسفر سیاهدانه شدند (جدول ۶).

با وجود تأثیر معنی‌دار منابع اصلاح‌کننده خاک در افزایش غلظت، جذب فسفر و شاخص برداشت فسفر در سیاهدانه، نتایج آزمایش حاکی از کاهش معنی‌دار کارایی جذب و مصرف فسفر در نتیجه کاربرد منابع اصلاح‌کننده خاک (شامل S+T، V+T و S+V+T) بود (جدول ۶). همچنین افزایش سطوح کاربرد کود فسفر به



شکل ۴. ارتباط بین عملکرد دانه با شاخص برداشت فسفر (الف)، کارایی جذب فسفر (ب) و کارایی مصرف فسفر (ج) سیاهدانه

در بهبود عملکرد کمی و کیفی سیاهدانه (Mohamed *et al.*, 2011; Tuncturk *et al.*, 2000) می‌توان بیان کرد که در خاک‌های آهکی، صرفاً افزایش کارایی جذب و مصرف فسفر نشان‌دهنده افزایش عملکرد نیست؛ بلکه براساس نتایج شکل ۳-الف، افزایش شاخص برداشت فسفر تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد کمی و کیفی سیاهدانه دارد.

#### نتیجه‌گیری کلی

در شرایط آهکی بودن خاک با مقدار کم فسفر، اکسیداسیون گوگرد به‌ویژه در کنار فراهمی منابع آلی می‌تواند نقش مؤثری در افزایش حلالیت فسفر خاک و جذب بیشتر فسفر در سیاهدانه داشته باشد. افزایش جذب فسفر بوته نیز می‌تواند جذب هرچه بیشتر نیتروژن توسط بوته را امکان‌پذیر کند. از سوی دیگر، با توجه به ارتباط مثبت بین عملکرد دانه و شاخص برداشت فسفر، به‌نظر می‌رسد مجموعه راهکارهایی که به تخصیص بیشتر فسفر زیست‌توده به دانه منجر شود، در افزایش عملکرد سیاهدانه بیش از پیش مؤثر خواهد بود.

به‌طور کلی بحث کارایی جذب در خاک‌هایی با مقادیر کم فسفر قابل استفاده مطرح است (Khorassani, 2010). با وجود این، ارتباط کارایی جذب یا مصرف فسفر با عملکرد گیاه از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است. به‌عنوان مثال در شرایط محدودیت فسفر خاک، ارقامی که توانایی بیشتری در جذب فسفر دارند، دارای کارایی جذب فسفر بیشتری‌اند که این کارایی زیاد به افزایش عملکرد این گیاهان منجر می‌شود (Schröder *et al.*, 2011; Veneklaas *et al.*, 2012). از شرایط دیگر، با افزایش مصرف کود فسفر در خاک، ضمن بهبود جذب فسفر و عملکرد گیاه، کارایی جذب ممکن است به‌ازای هر واحد افزایش فسفر خاک کاهش یابد (Rahim *et al.*, 2010). براساس نتایج این آزمایش، با توجه به ارتباط مثبت بین حلالیت فسفر خاک و جذب فسفر در گیاه (شکل ۱-الف) و نیز ارتباط منفی بین کارایی جذب فسفر و عملکرد سیاهدانه (شکل ۴-ب)، به‌نظر می‌رسد، در شرایط محدودیت فسفر خاک، سیاهدانه از فسفر موجود در خاک به‌طور کاراتری استفاده می‌کند. براساس نقش ویژه فسفر

#### REFERENCES

- Adhami, E., Maftoun, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J. & Assad, M. T. (2006). Inorganic Phosphorus Fractionation of Highly Calcareous Soils of Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37, 1877-1888.
- Arcand, M. M., Lynch, D. H., Voroney, R. P. & Van Straaten, P. (2010). Residues from a buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) green manure crop grown with phosphate rock influence bioavailability of soil phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science*, 90, 257-266.
- Biswas, D. R. & Narayanasamy, G. (2006). Rock phosphate enriched compost: An approach to improve low-grade Indian rock phosphate. *Bioresource Technology*, 97, 2243-2251.
- D'Antuono, L. F., Moretti, A. & Lovato, A. F. S. (2002). Seed yield, yield component, oil content and essential oil content and composition of *Nigella sativa* L. and *Nigella damascena* L. *Industrial Crops and Product*, 15, 59-69.
- Duan, Z., Xiao, H., Dong, Z., Li, X. & Wang, G. (2004). Combined effect of nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers and water on spring wheat yield in an arid desert region. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35, 161-175.
- El-Deen, E. & Ahmed, T. (1997). Influence of plant distance and some phosphorus fertilization sources on black cumin (*Nigella sativa* L.) plants. *Assist Journal of Agricultural Sciences*, 28, 39-56.
- Fageria, N. K. & Barbosa Filho, M. P. (2007). Dry-matter and grain yield, nutrient uptake, and phosphorus use-efficiency of lowland rice as influenced by phosphorus fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38, 1289-1297.
- Foroughifar, H. & Poor-Kasmani, M. E. (2002) *Soil Science and Management*. Ferdowsi University of Mashhad Press.
- Ghamarnia, H., Khosravy, H. & Sepehri, S. (2010). Yield and water use efficiency of (*Nigella sativa* L.) under different irrigation treatments in a semi-arid region in the West of Iran. *Journal of Medicinal Plants*, 4, 1612-1616.
- Hopkins, B. & Ellsworth, J. (2005). Phosphorus availability with alkaline/calcareous soil. *Western Nutrient Management Conference*, Salt Lake City, UT, 6, 88-93.
- Javadi, H. (2008). Effect of planting dates and nitrogen rates on yield and yield components of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6, 59-66. (In Farsi)

12. Kariminia, A. & Shabanpour, M. (2002). Evaluation of sulfur oxidation potential by heterotrophic microorganisms in different soils. *Water and Soil Science*, 17, 68-79. (In Farsi)
13. Khorassani, R. (2010). Phosphorus uptake efficiency in corn, sugar beet and groundnut. *Journal of Water and Soil*, 24, 180-188. (In Farsi)
14. Korkmaz, K., Ibrikci, H., Karnez, E., Buyuk, G., Ryan, J., Ulger, A.C. & Oguz, H. (2009). Phosphorus use efficiency of wheat genotypes grown in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 32, 2094-2106.
15. Lipman, J. G., Mc Lean, H. C. & Lint H. C. (1916). The oxidation of sulphur in soils as a means of increasing the availability of mineral phosphates. *Soil Science*, 1, 533-539.
16. Lopez-Aguirre, J. G., Larios, J. F., Gonzalez, S. G., Rosales, A. M. & De Freitas, J. R. (1999). Effect of sulfur application on chemical properties and microbial populations in a tropical alkaline soil. *Pedobiologia*, 43, 183-191.
17. Manske, G. G. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Van Ginkel, R. M., Rajaram, S. & Vlek, P. L. G. (2002). Phosphorus use efficiency in tall, semi-dwarf and dwarf near-isogenic lines of spring wheat. *Euphytica*, 125, 113-119.
18. Mazaheri, D. & Majnon Hoseini, N. (2007). *Fundamental of Agronomy*. Tehran University Press. (In Farsi)
19. Mohamed, S. A., Medani, R. A. & Khafaga, E.R. (2000). Effect of nitrogen and phosphorus applications with or without micronutrients on black cumin (*Nigella sativa* L.) plants. *Annals of Agricultural Science*, 3, 1323-1338.
20. Mohammady Aria, M., Lakzian, A., Haghnia, G. H., Berenji, A. R., Besharati, H. & Fotovat, A. (2010). Effect of *Thiobacillus*, sulfur, and vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. *Bioresource Technology*, 101, 551-554.
21. Mosavi Nik, M. (2012). Effect of drought stress and sulphur fertilizer on quantity and quality yield of psyllium (*Plantago ovata* L.) in Baluchestan. *Journal of Agroecology*, 4, 170-182.
22. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture, Circular no. 939.
23. Possinger, A. R., Byrne, L. B. & Breen N. E. (2013). Effect of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) on soil-phosphorus availability and organic acids. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176, 16-18.
24. Rahim, A., Ranjha, A. M., Rahamtullah, R. & Waraich, E. A. (2010). Effect of phosphorus application and irrigation scheduling on wheat yield and phosphorus use efficiency. *Soil & Environment*, 29, 15 - 22.
25. Salvagiotti, F., Castellarin, J. M., Miralles, D. J. & Pedrol, H. M. (2009). Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crop Research*, 113, 170-177.
26. Sameni, A. M. & Kasraian, A. (2004). Effect of agricultural sulfur on characteristics of different calcareous soils from dry regions of Iran. II. Reclaiming effects on structure and hydraulic conductivity of the soils under saline-sodic conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35, 1235-1246.
27. Schröder, J. J., Smit, A. L., Cordell, D. & Rosemarin, A. (2011). Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. *Chemosphere*, 84, 822-831.
28. Seyyedi, S. M., Khajeh Hossieni, M., Rezvani Moghaddam, P. & Shahandeh, H. 2013. Effect of the increasing soluble phosphorus on seed production and quality of black Seed (*Nigella sativa* L.) in a calcareous soil. *Journal of Horticultural Science*, in Press. (In Farsi).
29. Shenoy, V. V. & Kalagudi, G. M. (2005). Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. *Biotechnology Advances*, 23, 501-513.
30. Shirani, H., Abolhasani Zeraatkar, M., Lakzian, A. & Akhgar, A. (2011). Decomposition rate of municipal wastes compost, vermi compost, manure and pistaco compost in different soil texture and salinity in laboratory condition. *Water and Soil*, 25, 84-93. (In Farsi).
31. Sibbet, S. S. (1995). Managing high pH calcareous, saline, and sodic soils of the Western Pecan growing region. *Hort Technology*, 5, 222-225.
32. Singh, K. K., Srinivasarao, C. & Ali, M. (2005). Root growth, nodulation, grain yield, and phosphorus use efficiency of lentil as influenced by phosphorus, irrigation, and inoculation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 1919-1929.
33. Soaud, A. A., Al Darwish, F. H., Saleh, M. E., El-Tarabily K. A., Sofian-Azirun, M. & Rahman, M. M. (2012). Effects of elemental sulfur, phosphorus, micronutrients and *Paracoccus versutus* on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 554-561.
34. Tuncurk, M., Tuncurk, R. & Yildirim, B. (2011). The effects of varying phosphorus doses on yield and some yield components of black cumin (*Nigella Sativa* L.). *Advances in Environmental Biology*, 5, 371-374.
35. Ullah, I., Jilani G., Haq M. I. & Khan A. (2013). Enhancing bio-available phosphorus in soil through sulfur oxidation by *Thiobacilli*. *British Microbiology Research Journal*, 3, 378-392.
36. Veneklaas, E. J., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P. M., Lovelock, C. E., Plaxton, W.C., Price, C.A., Scheible, W., Shane, M.W., White, P.J. & Raven, J. A. (2012). Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist*, 195, 306-320.

37. Vidyalakshmi, R., Paranthaman, R. & Bhakayaraj, R. (2009). Sulphur oxidizing bacteria and pulse nutrition - A Review. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5, 270-278.
38. Waksman, S. A. & Joffe, J. S. (1922). The chemistry of the oxidation of sulfur by microorganisms to sulfuric acid and transformation of insoluble phosphates into soluble forms. *The Journal of Biological Chemistry*, 50, 35-45.
39. Zolfi Bavariani, M. & Nouruzi, M. (2010). Effect of organic matter on residual phosphorus recovering in a calcareous soil. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 14, 87-98.