نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) / الف / جلد 33 / شماره 2 / 1398

10.22092/ijsr.2019.124297.412

تأثیر تیمارهای زیستی فسفاتی و روی بر جزءبندی فسفرمعدنی در خاک ناحیه ریشه دو رقم لوبیا

محمود محمدی[1]، محمد جعفر ملکوتی، کاظم خاوازی، فرهاد رجالی و محمد حسین داوودی

استادیار پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران؛ **m.mohamadi@areeo.ac.ir**

استاد دانشگاه تربیت مدرس؛ **mjmalakouti@hotmail.com**

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

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

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

دریافت: **97/9/21** و پذیرش: **98/4/12**

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای زیستی فسفاتی و روی بر جزءبندی فسفر معدنی در خاک ناحیه ریشه دو رقم لوبیا آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتورهای این تحقیق شامل دو رقم لوبیا چیتی (تلاش و صدری)، چهار سطح فسفر (P_0: شاهد، P_1: مصرف سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک، P_2: مصرف کود زیستی فسفاتی و سوپر فسفات تریپل به میزان 50 درصد توصیه بر اساس آزمون خاک و P_3: مصرف کود زیستی فسفاتی) و سه سطح روی (Zn_0: شاهد، Zn_1: مصرف 50 کیلوگرم در هکتار سولفات روی و Zn_2: مصرف تیمار زیستی روی) بود. نتایج نشان داد بین دو رقم مورد آزمایش اختلاف معنی‌دار در میزان اجزاء دی‌کلسیم فسفات (Ca_2-P)، اکتا کلسیم فسفات (Ca_8-P)، آپاتیت فسفات (Ca_{10}-P) و فسفر کل وجود داشت. کمترین میزان اجزاء معدنی فسفر در خاک ناحیه ریشه رقم صدری حاصل شد. تیمار فسفری بر اجزاء معدنی فسفر به‌جز آلومینیوم فسفات (Al-P)، فسفات آهن(Fe-P) و فسفرمحبوس در اکسیدهای آهن (O-P) تفاوت معنی‌دار ایجاد نمود. در تیمار P_1، روند افزایشی و در تیمارهای P_2 و P_3، روند کاهشی در شکل های معدنی فسفر مشاهده شد. تیمار روی تفاوت معنی‌دار بر اجزاء معدنی فسفر به جز Al-P و O-P ایجاد نمود. حداقل مقادیر اجزاء فسفر از تیمار زیستی Zn_2 حاصل شد. در بین اثرات متقابل، اثرات متقابل سه گانه رقم در فسفر و روی بر Ca_2-P و Ca_{10}-P و اثر متقابل دوگانه فسفر و روی بر اجزاء Ca_2-P، Ca_8-P، Ca_{10}-P و فسفر کل معنی‌دار شدند. حداکثر این اجزاء از تیمارهای $C_1P_1Zn_0$ و P_1Zn_0 و حداقل از تیمارهای زیستی $C_2P_2Zn_2$، P_2Zn_2 و P_3Zn_2 حاصل شد. رقم صدری و تیمارهای زیستی فسفاتی و روی از کارآیی بالاتری در آزادسازی و جذب شکل‌های معدنی فسفر برخوردار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: میکوریزا، لوبیا رقم تلاش، رقم صدری، شکل‌های معدنی فسفر

---

[1]. نویسنده مسئول: آدرس: شهرکرد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، صندوق پستی: 415

مقدمه

فسفر (P) یکی از عناصر غذایی ضروری مورد نیاز رشد و نمو گیاه می‌باشد که در تغذیه لوبیا نقش بسزایی داشته وازدیدگاه زیست‌محیطی اهمیت ویژه دارد (مارشنر، 2012). استفاده از کودهای فسفری یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها جهت افزایش فرآهمی فسفر در خاک می‌باشد. معمولاً مصرف خاکی فسفر از کارآیی بالائی برخوردار نبوده زیرا در خاک بیش از 80 درصد فسفر به وسیله فرآیندهای جذب سطحی، رسوب عمدتاً به صورت فسفات‌های کلسیم،آهن و آلومینیم، تبدیل شدن به شکل آلی و تثبیت شدن از دسترس گیاه خارج می‌شود (گروتز و گرینوت، 2002؛ مارشنر، 2012). از این رو فراهمی و قابلیت دسترسی فسفر در خاک به ندرت برای رشد گیاه کافی می‌باشد. مصرف بی‌رویه و نامتعادل کودهای شیمیایی فسفری و تحرک پائین فسفر در خاک، باعث افزایش میزان فسفر کل در خاک می‌شود (دهقان و همکاران، 1386؛ جون و همکاران، 2010؛ خلیلی‌راد و میر سید حسینی، 2017؛ خسروی و همکاران، 2017؛ محمود سلطانی و صمدی، 2003؛ 24 مستشاری و همکاران 1388؛ نقی‌زاده و دردیپور، 1393؛ صمدی و گیلکس، 1999؛ ژانگ و همکاران، 2004). علی‌رغم بالا بودن فسفر کل خاک‌ها، غالباً فسفر به شکل‌های غیر قابل دسترس و یا شکل‌هایی در خارج از منطقه ریشه گیاه وجود دارد. بالا بودن میزان فسفر کل در خاک می‌تواند به‌عنوان منبعی برای تأمین فسفر گیاه محسوب شود (میشرا و همکاران، 2010؛ هینسینگر، 2001).

تجمع بیش از حد فسفر منجربه کاهش عملکرد ناشی از نسبت بالای فسفر به روی و یا فسفر به آهن گشته و مخاطرات زیست‌محیطی به همراه خواهد داشت (مارشنر، 2012). از این رو برای حفظ تولید و حفاظت از محیط زیست، باید از روش‌هایی استفاده کرد که با طبیعت سازگازتر بوده و تعادل زیست‌بومی خاک و محیط را حفظ نمایند. یکی از این روش‌ها استفاده از پتانسیل بیولوژیکی خاک‌ها و کودهای زیستی (مارشنر و دل، 1994؛ اسمیت و رد، 1997) می‌باشد. از جمله کودهای زیستی می‌توان به کودهای زیستی حاوی قارچ‌های میکوریزی و باکتری‌های حل‌کننده شکل‌های نامحلول فسفر و روی اشاره نمود (مارشنر و دل؛1994؛ میشرا و همکاران، 2010). اثرات مثبت قارچ‌های میکوریزی در تحرک‌بخشی به فسفر و جذب آن با مکانیسم‌های توسعه سطح ریشه، بالا بردن سرعت جذب توسط هیف قارچ و تسهیل انتقال توده‌ای فسفر، ترشح ترکیبات آلی تعدیل-کننده pH همانند اسید گلوکونیک و 2- گلوکونیک اسید وافزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز و دهیدروژناز امکان‌پذیر می‌شود (میشرا و همکاران، 2010؛ ژانگ و همکاران، 2004). از میان میکروارگانسم‌های افزایش دهنده رشد گیاه[1] باکتری‌های حل‌کننده فسفات[2] گروهی از میکروارگانیسم‌ها می‌باشند که توانائی تبدیل فسفات‌های معدنی نامحلول را به ترکیبات معدنی محلول و قابل دسترس گیاهان دارند (عباس‌زاده و همکاران، 2010؛ خان و همکاران، 2009؛ میشرا و همکاران، 2010). در میان باکتری‌های این خانواده باکتری گرم منفی *Pseudomonas* فراوانترین جنس در ریزوسفر خاک می‌باشد که فعالیت برخی از سویه‌های آن در مناطق مختلف شناخته شده است (عباس زاده و همکاران، 2010؛ خان و همکاران، 2009). آزادسازی ترکیبات فسفر معدنی توسط این باکتری‌ها با ترشح آسیدهای آلی مانند اسید اگزالیک، اسیدسیتریک، اسید گلوکونیک و اسید مالیک، تولید پروتون، ترکیبات کلات کننده و تولید آنزیم‌های فسفاتاز و فیتاز انجام می‌شود (میشرا و همکاران، 2010؛ عباس زاده و همکاران، 2010؛ خان و همکاران، 2009).

ریزوسفر یک محیط کوچک و مهم در اطراف ریشه است که خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی آن به علت فعالیت ریشه متفاوت از خاک اطراف است (هینسینگر، 2001؛ هینسینگر و همکاران، 2005). روابط متقابل بین خاک و ریشه در محیط ریزوسفر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر فراهمی فسفر برای گیاهان دارد (شن و همکاران، 2004؛ هینسینگر و همکاران، 2005). فراهمی فسفر برای گیاه به سازوکارهای مختلف کسب فسفر از ریزوسفر و تدابیر چندگانه بکار گرفته توسط گیاه برای برداشت فسفر بستگی دارد (شن و همکاران، 2004). یکی ازاین تدابیر افزایش اسیدیته ریزوسفر و استفاده از شکل‌هایی از فسفر با فراهمی پایین در محیط پیرامون خود می‌باشد (هینسینگر و همکاران، 2005؛ تانگ و همکاران، 2004). آگاهی از شکل‌های شیمیایی فسفر معدنی خاک و ارتباط آنها با یکدیگر اطلاعات مفیدی را برای ارزیابی وضعیت فسفر و حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه در اختیار محققین می‌گذارد (هارل و وانگ، 2007). صمدی و گیلکس (1999) گزارش نمود که توزیع فسفر در بین شکل‌های مختلف فسفر معدنی در خاک‌های کشت شده متفاوت از خاک‌های بکر بود. شن و همکاران (2004) گزارش نمودند، مقادیر قابل ملاحظه‌ای فسفر از شکل دی‌کلسیم فسفات Ca_2-P آزاد و توسط گیاه برنج جذب می‌شود. نجفی و توفیقی (2006) نیز گزارش

[1] Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

[2] Phosphate Solubilizing Bacteria

نمودند، مقدار Ca_2-P در ریزوسفر برنج نسبت به خاک کشت نشده به طور معنی‌داری کاهش یافت. بررسی‌های ژانگ و همکاران (2004) نشان داد با مصرف کودهای شیمیایی فسفری شکل‌های معدنی فسفر افزایش و شکل های آلی کاهش یافت. خلیلی راد و میر سید حسینی (2017) گزارش نمودند کمترین و بیشترین میزان شکل های معدنی فسفر در خاک ریزوسفر دو رقم گندم از تیمار بدون کاربرد و تیمار مصرف 25 میلی‌گرم در کیلوگرم کود فسفری در گلدان بدست آمد. تمام شکل‌های معدنی فسفر به غیر از آلومینیوم فسفات (Al-P) در خاک ریزوسفرنسبت به خاک توده کمتر بود و کمترین افزایش در شکل‌های معدنی فسفر خاک ریزوسفری با مصرف کود شیمیایی فسفری در رقم آزادی نسبت به رقم مرودشت که غیر کارآمد در جذب فسفر است مشاهده شد. آزمایش خسروی و همکاران (2017) نشان داد استفاده همزمان از باکتری *Pseudomonas fluorescens* و خاک فسفات در کاهو باعث افزایش وزن تر ساقه، وزن خشک اندام هوایی، جذب فسفر اندام هوایی و غلظت Ca_2-P در خاک می‌شود و باعث کاهش غلظت‌های Ca_8-P و Ca_{10}-P می‌شود. پیرس و همکاران (2006) نشان دادند

گندم، کلزا و تعدادی از لگوم‌ها توانایی‌های مختلفی در دسترسی به منابع و ترکیبات فسفر موجود در خاک دارند. صفری سنگانی و رشیدی (2011) گزارش نمودند تمام ده گونه گیاهی مورد مطالعه در تحقیق ایشان بطور معنی‌داری منجر به کاهش شکل‌های معدنی فسفر در خاک ریزوسفری در مقایسه با خاک غیر ریزوسفری شدند. در خاک‌های خنثی تا قلیایی فسفر با کربنات کلسیم و یون کلسیم واکنش داده و دی کلسیم فسفات که برای گیاهان قابل دسترس است، تولید می‌کند. در نهایت دی-کلسیم فسفات به شکل‌های پایدارتر مثل اکتا کلسیم فسفات و هیدروکسی آپاتیت (با قابلیت دسترسی کم برای گیاه) تبدیل می‌شود (آریا و اسپارکس، 2007). برای شناسایی شکل‌های شیمیائی فسفر پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است، تا ارتباط بین جذب فسفر به وسیله گیاه با فسفر خاک مشخص شود، اما بیشتر این پژوهش‌ها بر روی شکل‌های معدنی فسفرخاک در توده خاک می‌باشد و کمتر در سیستم‌های زیستی در ریزوسفر، همراه با گیاه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از این‌رو با توجه به تأثیر کودهای زیستی بر محیط ریزوسفر و اثر ریزوسفر بر جزءبندی فسفر و جذب عناصر غذایی این تحقیق در راستای افزایش جذب فسفر از منابع فسفر موجود در خاک با کاربرد کودهای زیستی فسفاتی و روی در دو رقم لوبیا چیتی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال 1394 به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار در گلخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی شهرکرد انجام شد. فاکتورهای آزمایشی عبارت بودند ازفاکتور اول، ارقام لوبیا چیتی شامل C_1: تلاش و C_2: صدری، فاکتور دوم کاربرد فسفر در چهار سطح P_0: شاهد، P_1: استفاده از کود شیمیایی فسفری سوپرفسفات تریپل بر اساس آزمون خاک، P_2: استفاده از کود زیستی فسفاتی و مصرف 50 درصد کود شیمیایی فسفری بر اساس آزمون خاک و P_3: استفاده از کود زیستی فسفاتی، فاکتور سوم کاربرد روی در سه سطح شامل Zn_0: شاهد، Zn_1: استفاده از کود شیمیایی سولفات روی مطابق آزمون خاک و Zn_2: استفاده از کود زیستی حاوی باکتری‌های حل‌کننده روی. تیمار کود زیستی فسفاتی مورد استفاده شامل مایه تلقیح حاوی باکتری حل‌کننده فسفات از جنس *Azotobacter chroococcum strain 5* و سه گونه قارچ میکوریزایی *Rhizophagus intraradices*، *Claroideoglomus etunicatum* و *Funneliformiss mosseae* بود. کود زیستی روی مورد استفاده، مایه تلقیح حاوی باکتری‌هایی از جنس *Pseudomonas aeuroginosa strain MPFM* و *Pseudomonas fluorescens strain 187* بود. قبل از اجرای آزمایش نمونه مرکب خاک از عمق 30 – 0 سانتیمتری تهیه و جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیائی به آزمایشگاه ارسال شد (جدول 1).

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

واکنش گل اشباع	قابلیت هدایت الکتریکی	فسفر	فسفر کل	پتاسیم	آهن	روی	منگنز	مس	نیتروژن	کربن آلی	مواد خنثی شونده	بافت
pH	$dS\ m^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$									٪	
7/8	0/88	6	710	311	4/1	0/58	9/8	0/93	0/07	0/92	24/5	*Silty Loam*

خاک مورد آزمایش از اراضی لوبیا کاری منطقه کیار استان چهارمحال و بختیاری انتخاب و به گلخانه انتقال داده شد و پس از عبور از الک، در گلدان‌های پنج کیلوگرمی (گلدان 96 = تکرار 4 × تیمار 24 =3 × 4 × 2) ریخته شد. بر اساس رده‌بندی خاک به روش آمریکایی(Soil Taxonomy , 2014) فامیل خاک مورد آزمایش Fine, mixed, mesic, Typic Calcixerepts بود (محمدی، 1365). کودزیستی فسفاتی به صورت دانه‌ای شامل قارچ‌های میکوریزی (با جمعیت حداقل 70 اسپور در هر گرم) و باکتری‌های حل کننده فسفات از جنسAzotobacter حاوی 10^8 × 1/8سلول باکتری در هرگرم به صورت مایه‌تلقیح بود. به ازای هر10 کیلوگرم قارچ‌های میکوریزی، یک کیلوگرم مایه تلقیح *Azotobacter* استفاده شد و به‌خوبی به‌هم زده شد. سپس به ازاء هر بذر مقدار دو گرم از این کود در چاله کاشت زیر بذر در هر گلدان قرار داده شد. از این دو گرم 1/8 گرم قارچ‌های میکوریزی و 0/2 گرم مایه تلقیح *Azotobacter* بود. در مورد کود زیستی روی، بذرها قبل از کشت با مایه‌ی تلقیح حاوی باکتری‌های حل‌کننده ترکیبات نامحلول روی با CFU 10^8 ×2/3 باکتری در هر گرم مایه تلقیح با نسبت پنج درصد به‌صورت بذرمال تلقیح شدند. به‌منظور باقی گذاشتن سلول‌های باکتری بر روی بذرها از محلول صمغ عربی استفاده شد. بعد از تلقیح بذری و اندکی هوا خشک شدن سطوح بذور بلافاصله اقدام به کشت گردید. بذور مورد استفاده از مرکز تحقیقات ملی لوبیا واقع در خمین استان مرکزی و مایه تلقیح و کودهای زیستی از بانک میکروبی بخش تحقیقات بیولوژی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. میزان کود فسفاتی و روی برای هر گلدان بر مبنای آزمون خاک محاسبه و قبل از کشت با خاک گلدان‌ها مخلوط شد. فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به میزان 25 و 12/5 میلی‌گرم در کیلوگرم برای تیمار P2 و P3 و روی از منبع سولفات روی به میزان 12/5 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار Zn1 به خاک اضافه شد (ملکوتی وغیبی، 1376). در هر گلدان پنج بذر لوبیا با فاصله مناسب کشت شد و پس از رسیدن بوته‌ها به مرحله دو برگی تنک شده و در نهایت سه بوته در هر گلدان باقی ماند. در زیر هر گلدان، زیر گلدانی کوچکی جهت آبدهی قرار داده شد و آبیاری فقط از طریق این زیر گلدانی انجام شد. زمان آبیاری با توجه به تغییرات دما، از طریق توزین سه گلدان انجام شد، به گونه‌ای‌که رطوبت گلدان در حد 60 درصد تخلیه از ظرفیت مزرعه نگه‌داشته شد. در طول دوره رشد مراقبت‌های لازم از قبیل آبیاری، تنظیم نور و رطوبت، مبارزه با آفات و امراض برای تمامی تیمارها به‌طور یکسان اعمال شد. در شروع غلاف‌بندی یعنی در اوج گلدهی (10 هفته بعد از کاشت) آبیاری قطع شد و اندام هوایی لوبیاهای خارج شده از گلدان از محل طوقه جدا شدند. برای به‌دست آوردن خاک ناحیه ریشه از روش چانگ و زاسوکی (1994) استفاده شد. بدین ترتیب که بوته‌های لوبیا موجود در هر گلدان از سطح گلدان به همراه خاک اطراف ریشه با دقت فراوان بیرون آورده و به آرامی تکان داده شدند. خاک جدا شده از ریشه‌ها به‌عنوان توده خاک[1] و خاک چسبیده به ریشه به‌دقت با قلم‌مو تراشیده و به‌عنوان خاک ریزوسفری[2] در نظر گرفته شد. برای جداسازی و تعیین شکل‌های معدنی فسفر در خاک ریزوسفری تیمارها از روش جیانگ و گو (1989) استفاده شد. این روش فسفر را به شکل‌های دی کلسیم فسفات (Ca_2-P)، اکتا کلسیم فسفات (Ca_8-P)،فسفات‌های آلومینیوم (Al-P)، فسفات‌های آهن (Fe-P)، فسفات‌های محبوس در اکسیدهای آهن (O-P) و آپاتیت (Ca_{10}-P) جدا می‌کند. خلاصه مراحل عصاره‌گیری به روشی که در این تحقیق بکار رفته است در جدول شماره دو آمده است. در هر مرحله عصاره‌گیری غلظت فسفر به‌وسیله دستگاه طیف‌سنج (مدلShimadzuUV 3100) اندازه‌گیری شد. همچنین غلظت فسفر قابل‌جذب به روش رنگ-سنجی، و فسفر کل به روش هضم توسط اسید پرکلریک در خاک ریزوسفری اندازه‌گیری شد (امامی، 1996). داده‌هاتوسط نرم افزارSAS 9.3 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

بین رقم‌های استفاده شده در این تحقیق اختلاف معنی‌داری (P<0/01) در شکل‌های معدنی دی‌کلسیم فسفات (Ca_2-P)، اکتا کلسیم فسفات (Ca_8-P) و آپاتیت فسفات (Ca_{10}-P) و فسفر کل خاک وجود داشت (جدول 3). رقم تلاش از میزان Ca_2-P، Ca_8-P، Ca_{10}-P و فسفر کل بیشتری در مقایسه با رقم صدری برخوردار بود (جدول 4). حداکثر مقادیر Ca_2-P، Ca_8-P، Ca_{10}-P و فسفر کل به‌ترتیب به‌میزان 22، 70/2، 211/6 و 682 میلی‌گرم در کیلوگرم از رقم تلاش به‌دست آمد (جدول 4). این نتیجه با نتایج تحقیقات پیرس و همکاران (2006)، صفری سنگانی و رشیدی (2011)، خلیلی راد و میرسیدحسینی (2017) مطابقت دارد.

1. Bulk Soil
2. Rhizosphere soil

جدول 2- خلاصه روش عصاره‌گیری دنباله‌ای و مشخصات شکل‌های معدنی فسفر به روش جیانگ و گو (1989)

شکل معدنی فسفر	علامت	عصاره‌گیر	غلظت
دی کلسیم فسفات	Ca_2-P	pH= 7/5؛$NaHCO_3$	0/25 M
اکتا کلسیم فسفات	Ca_8-P	pH= 4/2؛ NH_4AC	0/5 M
فسفات آلومینیوم	Al-P	pH=8/2؛ NH_4F	0/5 M
فسفات آهن	Fe-P	Na_2CO_3 ؛NaOH	0/ 1M
فسفرمحبوس در اکسیدهای آهن	O-P	NaOH؛$Na_2S_2O_4$ ؛Na_3Cit	0/ 3M
آپاتیت	Ca_{10}-P	H_2SO_4	0/ 25M

توزیع و تخلیه شکل‌های مختلف فسفر معدنی در ریزوسفر متأثر از نوع گونه گیاهی و نوع خاک (لی و همکاران، b 2008) می‌باشد. کارآیی کم و زیاد گونه‌های مختلف گیاهی در بدست‌آوردن فسفر از ترکیبات فسفری پیوند یافته با کلسیم به توانایی این گونه‌ها در اسیدی کردن محیط ریزوسفر بستگی دارد (هینسینگر، 2001؛ شن و همکاران، 2011). بررسی‌ها نشان می‌دهد ساختار ریشه‌ای گیاهان از قبیل شکل ظاهری و هندسی ریشه، طول، سطح، حجم و وزن خشک ریشه (هینسینگر و همکاران، 2005) و فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی موجود در ریزوسفر از جمله ترشح اسیدهای آلی و آمینو اسیدها (هینسینگر و همکاران، 20050)، تولید پروتون (هینسینگر و همکاران، 2005؛ لی و همکاران، 2008) و آنزیم فسفاتاز اسیدی (هینسینگر و همکاران، 2005؛ لی و همکاران، 2008؛ نی و همکاران، 2015؛ شن و همکاران، 2011) بر جذب فسفر معدنی تأثیر می‌گذارند. اکثر گیاهان خانواده لگوم از گیاهان خانواده غلات در استخراج فسفر مؤثرتر هستند که از طریق انحلال فسفر بواسطه اسیدی شده ریزوسفر (تانگ و همکاران، 2004) یا ترشح اسیدهای آلی (پیرس همکاران، 2006) می‌باشد. pH خاک ریزوسفری رقم صدری (7/54) در مقایسه با رقم تلاش (7/64) کمتر بود. همچنین درصد کلونیزاسیون ریشه‌ای در رقم صدری (44/46 درصد) بیشتر از رقم تلاش (30/52 درصد) بود (به دلیل حجیم شدن مقاله از آوردن آنها خودداری. شد). مقادیر کمتر شکل‌های معدنی فسفر و فسفر کل در ریزوسفر رقم صدری می‌تواند ناشی از درصد کلونیزاسیون ریشه‌ای بالاتر باشد. با افزایش درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه به منافذ بیشتری از خاک دسترسی پیدا نموده و به دلیل همزیستی میکوریزی بیشتر صورت گرفته در رقم صدری از طریق مکانیسم‌هایی از قبیل ترشح فسفاتاز اسیدی، اسیدهای آلی مانند اگزالاتها که دارای میل ترکیبی بالاتری با آهن، کلسیم و آلومینیوم نسبت به فسفر دارند و دسترسی به حجم منافذ و سطح خاک بیشتر (ازاوا و همکاران، 2005؛ مارشنر و دل، 1994؛ مروت و همکاران 2012؛ اسمیت و رد، 1997)، میزان بیشتری از شکل‌های معدنی فسفر آزاد شده و در دسترس ریشه و جذب توسط گیاه قرار می‌گیرد و باعث کاهش میزان شکل‌های معدنی فسفر در خاک ریزوسفری رقم صدری در مقایسه با رقم تلاش می‌شود. از طرف دیگر مجموعه این عوامل و سرعت رشد بیشتر، فتوسنتز بالاتر، سرعت جوانه زنی بیشتر، شاخ و برگ بیشتر، وزن تر و خشک اندام هوایی بیشتر رقم صدری منجر به رهاسازی فسفر تجمع یافته بیشتری در خاک ریزوسفری رقم صدری شده و متعاقب آن رشد گیاه و جذب آن افزایش یافته و باعث کاهش مقادیر این شکل‌های معدنی در این رقم می‌شود.

تیمار فسفری باعث تفاوت معنی‌دار ($P <0/01$) در میزان شکل های Ca_2-P، Ca_8-P، آلومینیوم فسفات (Al-P)، Ca_{10}-P، فسفر قابل جذب و فسفر کل شد (جدول 3). بیشترین میزان شکل‌های Ca_2-P، Ca_8-P، Al-P، Ca_{10}-P، فسفر قابل جذب و فسفر کل به‌ترتیب به‌میزان 23/7، 77، 129/2، 226، 10/3 و 742 میلی‌گرم در کیلوگرم بدست آمد که نسبت به تیمار حداقل (P_3) به‌ترتیب 21، 13، 10، 14/5، 26 و 11/2 درصد افزایش نشان داد (جدول4). تیمارهای P_3 و P_2 در اکثر صفات بررسی شده در یک گروه آماری مشترک قرار گرفته و اختلاف معنی‌داری باهم نشان ندادند (جدول4). افزایش شکل-های معدنی فسفر، فسفر قابل جذب و فسفر کل با مصرف کودهای شیمیایی فسفری در تیمار P_1 با نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران (2004)؛ جون و همکاران (2010)؛ محمود سلطانی و همکاران (2003)؛ دهقان و همکاران (1386) ؛ مستشاری و همکاران (1388) ؛ نقی‌زاده و دردیپور (1393)؛ خلیلی راد و همکاران (2017) مروت و همکاران (2012) و خسروی و همکاران (2017) مطابقت دارد.

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس تأثیر استفاده از تیمارهای فسفری و روی بر جزءبندی شکل‌های معدنی فسفر در خاک ناحیه ریشه دو رقم لوبیا

منابع تغییرات	درجه آزادی	دی‌کلسیم فسفات	اکتاکلسیم فسفات	آلومینیم فسفات	آهن فسفات	فسفات محبوس	آپاتیت فسفات	فسفر قابل جذب	فسفر کل
		میانگین مربعات							
رقم	1	103*	536*	135 ns	29ns	5/3ns	471*	120ns	510*
فسفر	3	218**	1402**	1561**	20/2ns	9/6ns	8025**	232**	7101**
روی	2	78**	90**	24ns	32/7*	3/6ns	1815**	82**	1925**
روی× فسفر	6	4/2**	46**	22 ns	18/5ns	7ns	27/8*	6/2ns	2/3*
فسفر× رقم	3	1/5**	0/63*	1/8ns	1/5ns	1/8ns	398**	4/5ns	4/2**
روی×رقم	2	1/6ns	0/61ns	4/7ns	0/9ns	1/4ns	16ns	4/6ns	19ns
فسفر×روی×رقم	6	1/4*	0/33 ns	28ns	2ns	2ns	4/5*	4/4ns	5/8ns
خطا	71	10	8/7	51/5	8/8	5/5	45/8	12	46/4
کل	95								
ضریب تغییرات		14	4/2	6	4/2	6	3/2	11	11/2

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

جدول 4- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای فسفری وروی بر جزءبندی شکل‌های معدنی فسفر در *خاک* ناحیه ریشه دو رقم لوبیا

	دی‌کلسیم فسفات	اکتاکلسیم فسفات	آلومینیم فسفات	آهن فسفات	فسفات محبوس	آپاتیت فسفات	فسفر قابل جذب	فسفر کل
	میلی‌گرم در کیلوگرم ($mg\ Kg^{-1}$)							
رقم								
C1 تلاش	22a	70/2a	122a	69/7a	39/5a	211/6a	8/2a	682 a
C2 صدری	20/5b	69/4b	120/4a	69a	39/2a	208/6b	7/6a	658b
فسفر (P)								
P_0	22/1b	69b	119/2b	69/3a	38/9a	212/5b	6/2c	705b
P_1	23/7a	77a	129/2a	70/1a	39/6a	226a	10/3a	742a
P_2	19/6c	68c	118/6 b	69/4a	39/1a	204/2c	8/5b	673c
P_3	19/6 c	65d	117/7b	68/6a	39a	197/7d	8/2b	665c
روی(Zn)								
Zn_0	22/1a	70/8a	122a	68/9b	39/1a	218/8a	8/6a	732a
Zn_1	21/5a	69/8b	120/7	69b	39/5a	208/2b	6/8b	723b
Zn_2	20/1b	68/6c	121a	70/1a	39/5a	206/3b	6/4b	674c

حروف مشابه در هر ستون و هر قسمت نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است

بنابراین غلظت فسفر موجود در محلول خاک و فرآهمی آن برای رشد گیاه از طریق جزءبندی فسفر و فرآیندهایی از قبیل رسوب‌گذاری و انحلال، جذب سطحی و آزادسازی که با فاز جامد خاک واکنش متقابل دارند کنترل می‌شود (17). در تیمارهای زیستی فسفر (P_2 و P_3) مقادیر شکل‌های معدنی فسفر، فسفر قابل جذب و فسفر کل نسبت به تیمار شاهد و تیمارP_1 روندکاهشی را نشان دادند. این نتایج با نتایج تحقیقات نجفی و توفیقی (2006)، دهقان و همکاران (1386)، صفری سنگانی و رشیدی (2011) مطابقت دارد. یکی از راه‌کارها برای افزایش جذب فسفر از خاک افزایش اسیدیته ریزوسفر گزارش شده است (هینسینگر و همکاران، 2005 و تانگ و همکاران، 2009). ریزوسفر به‌عنوان خاکی که تحت تأثیر فعالیت ریشه‌های زنده قرار می‌گیرد، تعریف می‌شود. یکی از سیستم‌های زیستی مفید برای گیاهان، همزیستی ریشه گیاهان با قارچ‌های میکوریزی می‌باشد (مارشنر و دل، 1994؛ اسمیت و رد، 1997). بررسی نتایج تحقیقات محققین نشان می‌دهد، نقش اصلی قارچ‌های میکوریزی تأمین عناصر غذایی بالاخص عناصر با تحرک پائین در خاک، عمدتاً فسفر و

روی برای گیاه است (مارشنر و دل، 1994؛ اسمیت و رد، 1997). قارچ‌های میکوریزی ضمن نفوذ در سیستم ریشه-ای گیاهان و برقراری رابطه همزیست میکوریزی، با گسترش شبکهٔ میسلیومی برون ریشه‌ای در خاک‌های اطراف ریشه، مقدار عناصر غذایی مخصوصاً فسفر بیشتری را جذب کرده و به گیاه انتقال می‌دهند. هیف‌های قارچی علاوه بر افزایش سطح جذب‌کنندگی ریشه، توان جذبی بالاتری نیز نسبت به ریشه‌های گیاه داشته، همچنین قدرت نفوذ هیف‌های قارچی در منافذ ریز در مقایسه با ریشه گیاهان بسیار بالاست (ازاوا و همکاران، 2005؛ مارشنر و دل، 1994؛ اسمیت و رد، 1997).

هیف‌های قارچی با رهاسازی اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفات‌آز موجب انحلال ترکیبات فسفر خاک می‌شوند و به همین دلیل جذب فسفر در خاک‌های فقیر از نظر منبع فسفر قابل‌جذب در گیاهان میکوریزایی افزایش نشان می‌دهد (ازاوا و همکاران، 2005؛ مارشنر و دل، 1994؛ مروت و همکاران 2012؛ اسمیت و رد، 1997). همچنین هیفهای قارچ‌های میکوریزی با افزایش مناطق تخلیه فسفر منجر به افزایش جذب فسفر و انتقال آن به داخل اندام‌های مختلف گیاهی می‌شود. به نظر می‌رسد جذب فسفر توسط ریشه گیاه منجر به تخلیه مخازن قابل دسترس فسفر در خاک‌ریزوسفری می‌شود.

همچنین جذب یون‌های دیگر مانند کلسیم و منیزیم توسط قارچ‌های میکوریزی باعث پخشیدگی یا انحلال کانی‌های مانند فسفات‌های آهن،آلومینیوم و کلسیم می‌گردد (مارشنر و دل، 1994؛ نجفی و توفیقی، 2006؛ اسمیت و رد، 1997). بنابراین، مقادیر قابل ملاحظه‌ای فسفر از شکل دی کلسیم فسفات آزاد و می‌تواند توسط لوبیا جذب شود و مقدار این شکل را در خاک ریزوسفرکاهش دهد (نجفی و توفیقی، 2006). قارچ‌های میکوریزی و باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه مثل باکتری *Azotobacter* و *Pseudomonas* توان افزایش جذب عناصر غذایی، به‌ویژه زمانی که با هم استفاده می‌شوند را دارند (اسمیت و رد، 1997).

تیمار زیستی فسفاتی مورد استفاده در این تحقیق شامل قارچ‌های میکوریزی و باکتری *Azotobacter* حل‌کننده فسفات می‌توانند از طریق ترشح اسیدهای آلی، اسیدی کردن خاک و یا ترشح آنزیم‌های فسفاتاز، باعث رهاسازی یون فسفات و افزایش قابلیت جذب آن شوند (عباس‌زاده و همکاران، 2010؛ خان و همکاران، 2009،مارشنر و دل، 1994؛ میشرا و همکاران، 2010؛ اسمیت و رد، 1997). تیمار مصرف روی، اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد ($P<0/01$) بر میزان Ca_2-P، Ca_8-P، Ca_{10}-P، فسفر قابل جذب و فسفر کل و بر Fe-P در سطح پنج درصد ($P<0/05$) ایجاد نمود (جدول 3). بیشترین میزان Ca_2-P، Ca_8-P، Ca_{10}-P و فسفر کل به‌ترتیب به میزان 22/1، 70/8 ، 215/8 و 732 میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار Zn_0 حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (تیمار Zn_2) به ترتیب افزایش 10، 4، 4/6 و 9 درصدی را نشان داد (جدول 4). در مورد Fe-P بیشترین مقدار از تیمار Zn_2 به‌میزان 70/1 میلی‌گرم در کیلوگرم و کمترین میزان از تیمارهای Zn_0 و Zn_1 به‌میزان 69 میلی-گرم در کیلوگرم حاصل شد (جدول 4). حداکثر میزان فسفر قابل جذب از تیمار Zn_0 به میزان 8/6 میلی‌گرم در کیلوگرم و حداقل از تیمارهای Zn_1 و Zn_2 بدست آمد (جدول 4). این نتایج با نتایج تحقیقات ردریگز و فراجا، 1999 و خسروی و همکاران، 2017 مطابقت دارد. به دلیل آثر آنتاگونیسمی فسفر با روی با مصرف روی میزان فسفر قابل جذب کاهش پیدا می‌کند (مارشنر، 2012). باکتری *Pseudomonas* استفاده شده در این تحقیق توانایی حل کردن ترکیبات فسفر معدنی و افزایش ذخیره فسفر را برای گیاه از طریق تولید اسیدهای آلی، تولید پروتون و اسیدی کردن محیط ریشه را دارند (عباس‌زاده و همکاران، 2010؛ خان و همکاران، 2009؛ میشرا و همکاران، 2010). با فراهم شدن شرایط، حل شدن شکل‌های معدنی فسفر افزایش و جذب این شکل‌های توسط گیاه افزایش پیدا نمود و متعاقب آن از میزان غلظت شکل‌های قابل جذب فسفر معدنی خاک کاسته شد.

در بین اثرات متقابل، اثر متقابل فسفر در روی بر میزان Ca_2-P و Ca_8-P در سطح یک درصد ($P<0/01$) و بر Ca_{10}-P و فسفر کل در سطح پنج درصد ($P<0/05$) تفاوت معنی‌دار ایجاد نمود. بر همکنش رقم در فسفر بر میزان Ca_2-P و Ca_{10}- P و فسفر کل در سطح یک درصد ($P<0/01$) و بر Ca_8-P در سطح پنج درصد ($P<0/05$) اختلاف معنی‌دار ایجاد نمود. حداکثر مقدار Ca_2-P، Ca_8-P ، Ca_{10}-P و فسفر کل به ترتیب به میزان 24/5، 77/3، 229/3 و 750 میلی گرم در کیلوگرم از تیمار C_1P_1 حاصل شد. حداقل مقدار Ca_2-P، Ca_8-P ، Ca_{10}-P و فسفر کل به ترتیب به میزان 18/7، 64/6، 196/4 و 663 میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار C_2P_3 بدست آمد. اثر متقابل سه گانه رقم در فسفر در روی فقط بر میزان Ca_2-P و Ca_{10}-P تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد ($P<0/05$) ایجاد نمود (جدول 3). در خصوص اثرات سه گانه معنی‌دار رقم در فسفر در روی کمترین و بیشترین میزان Ca_2-P از تیمارهای $C_2P_2Zn_2$ و $C_1P_1Zn_0$ به ترتیب به میزان 17/5 و 25/3 میل‌گرم در کیلوگرم حاصل شد. همچنین حداکثر

و حداقل Ca_{10}-P به ترتیب از تیمارهای $C_1P_1Zn_0$ و $C_2P_3Zn_2$ به‌میزان 236/1 و 193/5 میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد (جدول 6). این نتایج نشان داد رقم صدری و تیمارهای زیستی فسفاتی و روی توان و پتانسیل بیشتری برای جذب دی کلسیم فسفات و آپاتیت فسفات داشته اند. از این رو در این رقم و در این تیمارها به دلیل آزادسازی این شکل‌های فسفر و جذب بیشتر آن توسط رقم صدری مقدار کمتری دی کلسیم فسفات و آپاتیت فسفات در خاک ریزوسفری وجود دارد. دیگر اثرات متقابل سه گانه رقم در فسفر در روی بر دیگر شکل‌های معدنی فسفر معنی‌دار نشد.

در خصوص اثرات متقابل فسفر و روی بر شکل های معدنی فسفر معنی‌دار شده، حداکثر مقدار Ca_2-P از تیمار P_1Zn_0 بدست آمد که با تیمارهای P_1Zn_1 و P_1Zn_2 تفاوت معنی‌دار نداشت ولی نسبت به تیمار شاهد افزایش 7 درصدی را نشان داد و نسبت به تیمار حداقل (تیمار P_3Zn_2 با 19 میلی‌گرم در کیلوگرم Ca_2-P)، 35 درصد افزایش نشان داد. بیشترین میزان جزء Ca_8-P از تیمار P_1Zn_0 حاصل شد که نسبت به شاهد افزایش 17 درصدی و نسبت به تیمار حداقل (تیمار P_3Zn_2)، 24/5 درصد افزایش نشان داد. در مورد Ca_{10}-P بیشترین میزان این فرم معدنی فسفر از تیمار P_1Zn_0 حاصل شد که نسبت به شاهد افزایش 7 درصدی و نسبت به تیمار حداقل افزایش 20 درصدی نشان داد.

جدول 5- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل دوگانه تیمارهای فسفری و روی بر جزءبندی شکل های معدنی فسفر در خاک ناحیه ریشه دو رقم لوبیا

تیمار	دی‌کلسیم فسفات	اکتاکلسیم فسفات	آلومینیم فسفات	آهن فسفات	فسفات محبوس	آپاتیت فسفات	فسفر قابل جذب	فسفر کل
				میلی‌گرم در کیلوگرم				
P0Zn0	23/2a	67/6d	120/3a	69/4a	39/7 a	218/6b	6/8a	700c
P0Zn1	22/7 a	70/1c	118/5a	69/8 a	39/4 a	210c	7a	698c
P0Zn2	20/4b	69/7c	119a	70a	40/7 a	209c	7/2 a	685d
P1Zn0	24/8a	78/9a	129/5a	70/5 a	39a	233a	9/4 a	756a
P1Zn1	23/6a	76/6b	131/8 a	68/6 a	39/8 a	224b	8/8 a	745b
P1Zn2	22/7a	75/5b	126/5a	71/2 a	40a	220/8b	8/6 a	734b
P2Zn0	20/1b	70/5c	119/8 a	68/2 a	39/2 a	209/8c	8/5a	725b
P2Zn1	20/2b	67/5d	117/4a	68/9 a	39/1 a	202d	8/4 a	694cd
P2Zn2	18/4b	65/8de	118/7a	71a	39/2 a	206/6ed	8/7 a	662e
P3Zn0	20/3b	66/6de	118/2a	67/8 a	38/7 a	201/6ed	8/5 a	695cd
P3Zn1	19/6b	65ef	120/ 8a	68/7 a	39/8 a	196/7ef	8/3 a	687cd
P3Zn2	19b	63/5f	114/4 a	69/4a	38/3 a	194/7f	8/1 a	672c

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است

در خصوص فسفر کل بیشترین مقدار فسفر کل از تیمار P_1Zn_0 حاصل شد که نسبت به شاهد افزایش 8 درصدی و نسبت به تیمار حداقل (تیمار P_2Zn_2)، 14 درصد افزایش نشان داد (جدول 5). با وجود معنی‌دار نشدن اثر متقابل فسفر در روی بر دیگر شکل‌های معدنی فسفر، کمترین میزان این شکل‌های از تیمارهای زیستی فسفاتی و روی و بیشترین مقادیر از تیمارهای مصرف کود شیمیایی فسفری حاصل شد (جدول 5). در خصوص اثرات متقابل معنی‌دار رقم در تیمار فسفری حداقل مقدار Ca_2-P از تیمار C_2P_3 و حداکثر از تیمار C_1P_1 به‌ترتیب به‌میزان 18/98 و 45/ 24 میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد. حداقل و حداکثر Ca_8-P به‌ترتیب به‌میزان 64/7 و 77/3 میلی گرم در کیلوگرم از تیمارهای C_2P_3 و C_1P_1 حاصل شد. حداقل و حداکثر Ca_{10}-P به‌ترتیب به‌میزان 199 و 230 میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمارهای C_2P_3 و C_1P_1 حاصل شد. حداقل و حداکثر فسفر کل به‌ترتیب به‌میزان 670 و 687 میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمارهای C_2P_3 و C_1P_1 حاصل شد. همچنین در خصوص اثر متقابل معنی‌دار رقم در فسفر در روی بر اجزاء معدنی Ca_2-P و Ca_{10}-P، کمترین و بیشترین میزان Ca_2-P به‌ترتیب به‌میزان 16/8 و 26 میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب از تیمارهای $C_2P_3Zn_2$ و $C_1P_1Zn_0$ حاصل شد. در خصوص Ca_{10}-P، حداقل و حداکثر این جزء فسفر معدنی به‌ترتیب به‌میزان 197/6 و 238 میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب از تیمارهای

$C_2P_3Zn_2$ و $C_1P_1Zn_0$ حاصل شد. این نتایج بیانگر این موضوع است که رقم صدری و تیمارهای زیستی فسفر و روی در آزادسازی اجزاء معدنی فسفر و جذب آنها از کارآیی بالاتری برخوردار می‌باشند. زیرا در این آزمایش pH خاک ریزوسفری رقم صدری (7/54) در مقایسه با رقم تلاش (7/64) کمتر می‌باشد و از طرفی درصد کلونیزاسیون ریشه‌ای در رقم صدری بیشتر از رقم تلاش است. این عوامل بیانگر همزیستی بیشتر و کارآیی بالاتر رقم صدری در انحلال و آزادسازی شکل‌های معدنی فسفر می‌باشد. فراوانی شکل‌های معدنی فسفر در خاک ناحیه ریشه که در جدول 5 آمده است، به‌صورت زیر می‌باشد.

جدول 6- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سه گانه رقم و تیمارهای فسفری و روی بر شکل‌های معدنی دی کلسیم فسفات و آپاتیت فسفات در خاک ناحیه ریشه دو رقم لوبیا

آپاتیت فسفات	دی کلسیم فسفات	
میلی گرم در کیلوگرم		
222/5cde	23/2abc	$C_1P_0Zn_0$
213/8 hgf	23/3 abc	$C_1P_0Zn_1$
213/9hgf	21/3bcdef	$C_1P_0Zn_2$
236/1a	25/3a	$C_1P_1Zn_0$
231/2ab	24/5ab	$C_1P_1Zn_1$
225/6 bcd	24/2 ab	$C_1P_1Zn_2$
210/2igh	21/1bcdef	$C_1P_2Zn_0$
201mjlk	21bcdefg	$C_1P_2Zn_1$
200/4mjlk	19/3defg	$C_1P_2Zn_2$
200/6 mjlk	21bcdefg	$C_1P_3Zn_0$
195ml	20/3cdefg	$C_1P_3Zn_1$
195/9klm	19/5defg	$C_1P_3Zn_2$
214/7efg	23/3abc	$C_2P_0Zn_0$
206 jhi	22/2 abcde	$C_2P_0Zn_1$
205/2ij	19/3defg	$C_2P_0Zn_2$
230/1abc	24/3ab	$C_2P_1Zn_0$
221def	22/8abcd	$C_2P_1Zn_1$
216/7 efg	21/8 bcdef	$C_2P_1Zn_2$
209/7ghi	19/1efg	$C_2P_2Zn_0$
203/6ijk	19/5defg	$C_2P_2Zn_1$
200/8jklm	17/5g	$C_2P_2Zn_2$
202/6ijkl	19/6defg	$C_2P_3Zn_0$
198/5jklm	18/9efg	$C_2P_3Zn_1$
193/5m	18/4fg	$C_2P_3Zn_2$

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است. C1:رقم تلاش C2: رقم صدری

دی کلسیم فسفات < فسفر محبوس شده < فسفات آهن < اکتا کلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < آپاتیت

مستشاری و همکاران (1388) نتایج مشابهی درخاک‌های استان قزوین به‌دست آوردند. نتایج به‌دست آمده با نتایج صمدی و گیلکس (1999) به غیر از میزان آپاتیتها مطابقت دارد. این محققین گزارش نمودند، مقدار آپاتیت و دی کلسیم فسفات تقریباً برابرند. مطابق جدول چهار در تیمار مصرف کود شیمیایی فسفری (تیمارP_1)، تمام شکل های معدنی فسفر افزایش پیدا کردند. در تیمارهای زیستی فسفاتی (P_2 وP_3) مقادیر این شکل‌های معدنی نسبت به تیمار شاهد روند کاهشی را نشان دادند. جزء معدنی Ca_2-P از شکل‌های معدنی فسفر است که می‌تواند از فسفر محلول تولید شود و یا اینکه در اثر انحلال ترکیبات نامحلول‌تر فسفر در خاک ایجاد گردد (لیندسی، 2001) این جزء مهمترین جزء فسفر معدنی قابل دسترس گیاه در خاک است (صمدی و گیلکس، 1999). میزان Ca_2-P در مقایسه با دیگر اجزای فسفر معدنی پایین‌تر است. علت این امر، ناپایدار بودن این ترکیب و تبدیل آن به سایر

ترکیبات فسفر معدنی می‌باشد (لیندسی، 2001) بنابراین میزان تغییرات Ca_2-P می‌تواند برای گیاه اهمیت داشته باشد. مصرف کود شیمیایی فسفری باعث افزایش این جزء معدنی فسفر می‌شود (دهقان و همکاران، 1386؛ نقی‌زاده و همکاران 1994؛ صفری‌سنگانی و رشیدی، 2011؛ صمدی و گیلکس، 1999) هر عاملی که باعث انحلال این ترکیب گردد برای گیاه مفید است. از بین تیمارهای فسفری، حداکثر مقدار Ca_2-P از تیمار مصرف کود شیمیایی فسفری و حداقل از تیمار زیستی فسفاتی به‌دست آمد. همچنین تیمار زیستی روی (Zn_2) دارای مقدار کمتری از این فرم معدنی فسفر بود. این کاهش بیانگر تأثیر تیمارهای زیستی فسفر و روی با مکانیسم‌های خاص خود از قبیل از قبیل ترشح فسفاتاز اسیدی، اسیدهای آلی و معدنی و دسترسی به حجم منافذ و سطح خاک بیشتر از توان و پتانسیل بیشتری برای انحلال اجزاء معدنی فسفر برخوردار می‌باشند که می‌توانند فسفر را به‌صورت قابل‌جذب در اختیار گیاه قرار دهند.

بررسی‌های شن و همکاران (2004) نشان داد، کاربرد کود فسفری در یک خاک آهکی تحت کشت برنج در سال‌های ابتدایی باعث افزایش مقدارCa_2-P می‌گردد و در سال‌های بعد مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. درحالی‌که عدم کاربرد کود فسفری در همین خاک، مقدار Ca_2-P روند کاهشی داشته که این روند کاهشی در سال‌های ابتدایی بیشتر بود. کاربرد کود فسفری در کوتاه‌مدت می‌تواند باعث افزایش مقدار Ca_2-P در خاک گردد درحالی‌که در دراز مدت تأثیر چندانی بر Ca_2-P ندارد. همچنین مقادیر قابل ملاحظه‌ای فسفر از شکل Ca_2-P در ریزوسفر آزاد و توسط گیاه برنج جذب می‌شود. تحقیقات جون و همکاران (جون و همکاران، 2010) نشان دادند که کاربرد مقادیر متفاوت کود فسفاتی در طی 21 سال مقدار Ca_2-P بین 1/1 تا 2/2 درصد افزایش داده است. این ترکیب به‌سرعت تشکیل می‌شود (دو هفته بعد از اضافه نمودن کود) دارای ضریب پایداری کمی می‌باشد و می‌تواند به ترکیبات نامحلول‌تر فسفر تبدیل گردد (لیندسی، 2001). تیمارهای زیستی فسفاتی و روی شامل قارچ‌های میکوریزی، باکتری‌های *Azetobacter* و *Pseudomonas* مورد استفاده در این تحقیق،می‌توانند به‌واسطه تغییرات شیمیایی ناشی از فعالیت ریشه در ریزوسفر مانند کاهش pH از طریق تولید پروتون، ترشح اسیدهای آلی و افزایش فعالیت میکروبی، تولید مواد کلات‌کننده و سیدروفورها، تراوش آنزیم‌های فسفات‌آز اسیدی، افزایش تعداد ریشه‌های جانبی، سطح ویژه ریشه و تارهای کشنده بر حل کردن ترکیبات نامحلول همچون Ca2-P تأثیر گذاشته و این ترکیب را به‌صورت ترکیبات محلول فسفر درآورده و مورد استفاده گیاه قرار دهند، که می‌تواند دلیلی بر کاهش این ترکیب در تیمارهای زیستی در ریزوسفر باشد (هینسینگر و همکاران، 2005؛ خسروی و همکاران، 2017، شارما و همکاران، 2011؛ شن و همکاران، 2004). بنابراین Ca2-P موجود در خاک‌های آهکی یکی از منابع قابل‌جذب فسفر برای گیاه لوبیا می‌باشد.

از ترکیبات نامحلول فسفری که در خاک‌های چهارمحال و بختیاری به مقدار زیادی وجود دارد آپاتیت‌ها (Ca10-P)، آلومینیم فسفات (Al-P) و اکتا کلسیم فسفات (Ca8-P) می‌باشد (دهقان و همکاران، 1386). میزان بالاتر بودن اکسیدهای آلومینیوم در خاک‌های با تکامل بیشتر در استان چهارمحال و بختیاری از دلایل بیشتر بودن Al-P در این خاک‌ها می‌باشد. در این تحقیق نیز متوسط مقدار این شکل‌های معدنی فسفر از دیگر شکل‌های معدنی بیشتر بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که 75 درصد از کود فسفاتی مصرفی برای گیاه، از دسترس گیاه خارج می‌شود و به شکل ترکیبات نامحلول‌تر نظیر اکتا کلسیم فسفات و آپاتیت‌ها تبدیل می‌شود (دهقان و همکاران، 1386؛ ژانگ و همکاران، 2004). استفاده از تیمارهای زیستی فسفاتی و باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌تواند یکی از راهکارهای استفاده مجدد از این ترکیب نامحلول فسفاتی باشد. کودهای زیستی می‌توانند با ترشح ترکیبات شیمیایی خاص مانع از تبدیل ترکیبات کم محلول به ترکیبات نامحلول‌تر گردند و باعث افزایش حلالیت این ترکیبات شوند. مقدار کمتر این شکل های در تیمارهای زیستی به‌دلیل افزایش حلالیت و قابلیت دسترسی آن‌ها و جذب بیشتر توسط اندام‌های هوایی گیاه و ریشه‌ها می‌باشد. نتایج تحقیقات صفری سنگانی و رشیدی (2011) نشان داد، تغییرات آپاتیت‌فسفات‌ها متأثر از فعالیت میکروبی بالاخص همزیستی میکوریزی بالاتر در ریزوسفر در مقایسه با دیگر مناطق خاک می‌باشد. معنی‌دار نشدن شکل هایFe-P و OC-P در تیمارهای مصرفی می‌تواند به دلیل مقدار بسیار کم این شکل های در خاک‌های آهکی باشد. به نظرمی‌رسد این شکل‌های از فسفر نقش زیادی در جذب فسفر برای لوبیا نداشته باشند. با این وجود در تیمارهای زیستی مقدار کمتری از این دو شکل فسفر به دست آمد.

نتیجه‌گیری

با وجود بالا بودن میزان فسفر کل خاک در خاک‌ها، اما اغلب به فرم‌هایی وجود دارد که برای گیاه غیر قابل استفاده است. کارآیی رقم صدری در آزادسازی

و جذب شکل‌های معدنی فسفر در خاک ریزوسفری از رقم تلاش بیشتر است. با توجه به میزان فسفر کل بالای خاک مورد آزمایش، تیمار زیستی فسفاتی و روی استفاده شده در این تحقیق شامل قارچ‌های میکوریزی و باکتری-های *Azetobacter* و *Pseudomonas* حل‌کننده فسفات با مکانسیم‌های خاص خود بر جزءبندی شکل‌های معدنی فسفر اثر گذاشته و می‌توانند موجب افزایش فرآهمی شکل‌های معدنی فسفر شده و از این طریق فسفر مورد نیاز لوبیا را از منابع فسفر موجود در خاک تأمین کنند.

فهرست منابع:

1. امامی، ع. 1375. روش‌های تجزیه گیاه. موسسه تحقیقات خاک و آب. جلد اول. نشریه فنی شماره 982.
2. دهقان،ر. ع.، ح، شریعتمداری، و ح، خادمی. 1386. شکل‌های فسفر خاک در چهار ردیف اراضی در منطقه اصفهان و شهرکرد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، 42: 473- 463.
3. ملکوتی، م. ج. و م. ن. غیبی. 1376. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی محصولات استراتژیک و توصیه صحیح کودی در کشور. نشر آموزش کشاورزی، 56 صفحه.
4. محمدی م. 1365. گزارش مطالعات خاک‌شناسی نیمه تفصیلی استان چهارمحال و بختیاری (مناطق شهرکرد و بروجن). موسسه تحقیقات خاک و آب، نشریه فنی شماره 696. 239 صفحه.
5. مستشاری، م.، م. م. اردلان، ن، کریمیان، ح، رضایی، و ح، میر حسینی، 1388. توزیع شکل‌های معدنی فسفر و ارتباط آن با ویژگی‌های خاک در برخی خاک‌های آهکی استان قزوین. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، 23: 22–11.
6. نقی‌زاده اصل، ز.، و ا. دردی‌پور. 1393. اثر کشت گندم بر شکل‌های مختلف فسفر معدنی در خاک‌های لسی استان گلستان. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، 4 (4): 330-313.
7. Abbas-Zadeh, P., N, Saleh-Rastin, H. Asadi-Rahmani, K. Khavazi , A. Soltani , A.R. Shoary-Nejati, and M. Miransari. 2010. Plant growth-promoting activities of fluorescent *pseudomonads*, isolated from the Iranian soils. Acta Physiologiae Plantarum, 32:281-288.
8. Arai, Y. and D.L. Sparks 2007. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: a multiscale approach. Journal of Advance Agronomy, 94: 135–179.
9. Chung, J.B., and R. J. Zasoski. 1994. Ammonium potassium and ammonium calcium exchange equilibria in bulk and rhizosphere soil. Journal of Soil Science, 58: 1368- 1375.
10. Ezawa, T., M. Hayatsu, and M. Saito. 2005. A new hypothesis on the strategy for acquisition of phosphorus in arbuscular mycorrhiza: Up-regulation of secreted acid phosphatase gene in the host plant. Journal of Molecular Plant-Microbe Interactions, 18(10):1046-1053.
11. Grotz, N., and M.L. Guerinot. 2002. Limiting nutrients: an old problem with new solutions. Journal of Plant Biology, 5: 158-163.
12. Harrell, D.L. and J.J. Wang, 2007. Evaluation of three- and five-step inorganic phosphorus chemical fractionation procedures along with inductively coupled plasma determination for calcareous soils. Journal of Soil Science, 172: 55-67.
13. Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. Journal of Plant Soil, 237 (2): 173–195.
14. Hinsinger, P., G. R. Gobran., P. J. Gregory, and W.W. Wenzel 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. Journal of New Phytologist, 168: 293-303.
15. Jiang, B., and Y. Gu. 1989. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. Journal of Fertilizer Research, 20: 159-165.

16. Jun, W., L. Wen-Zhao, M. Han-Feng, and D. Ting-Hui, 2010. Inorganic Phosphorus Fractions and Phosphorus Availability in a Calcareous Soil Receiving 21-Year Superphosphate Application. Journal of Pedosphere, 20: 304–310.
17. Khalili-Rad, R., and H, Mirseyed Hosseini. 2017. Assessing the Effect of Phosphorus Fertilizer Levels on Soil Phosphorus Fractionation in Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils of Wheat. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 48 (16): 1931-1942.
18. Khan, A. A., G, Jilani, M. S. Akhtar, S. M. S. Naqvi, and M. Rasheed. 2009. Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. Journal of Agriculture and Biology Science, 1:48-58.
19. Khosravi, A., M. Zarei, and A. Ronaghi. 2017. Influence of biofertilizers and phosphate sources on the Phosphorus uptake of lettuce and chemical forms of Phosphorus in Soil. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 48 (22): 2701-2714.
20. Li Y.F., A. C. Luo, X. H. Wei, and X.G. Yao. 2008b Changes in phosphorus fractions, pH, and phosphatase activity in rhizosphere of two rice genotypes. Journal of *Pedosphere*, 18:785–794.
21. Lindsay, W. L. 2001. Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley and Sons. Inc. 449 pages.
22. Mahmoud Soltani, S, and A. Samadi. 2003. Phosphorus fractionation of some calcareous soils in Fars province and their relationships with some soil properties. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 3 (7):119–28.
23. Marschner, P. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Waltham, MA, USA.
24. Marschner, H. and B. Dell 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. Plant and Soil, 159: 89 – 102.
25. Mishra, A, K. Prasad, and R. Geeta. 2010. Effect of biofertilizer inoculation on growth yield of dwarf field Pea (*Pisum sativum* L.) in conjuncton with different doses of chemical fertilizers. Journal of Agronomy, 9: 163-168.
26. Morovvat, A, A, Ronaghi, M. Zarei, M. Emadi, M.B. Heidarianpour and L. Gholami. 2012. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi application on distribution of phosphorus forms in rhizosphere soils of sunflower (*Helianthus annuus* L.). International Journal of Agricultural Science, Research and Technology, 2 (2):77–82.
27. Najafi, N., and H, Towfighi. 2006. Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorus fractions in the paddy soils of north of Iran: 1. Native inorganic phosphorus fractions. Journal of Agricultural Science, 37: 5. 919-935.
28. Niu, X.J, L. Li, H.Wu, X.F. Song, S.C. Lai, Z.Q. Yang, D.H. Zou. 2015. Effects of phosphine on enzyme activities and available phosphorus in rhizospheric and non-rhizospheric soils through rice seedlings. Journal of Plant and Soil, 387 (1–2), 143–151.
29. Pearse, S.J., E.J. Veneklaas, G. Cawthray, M.D.A. Bolland, and H. Lambers. 2006. Triticum aestivum shows a greater biomass response to a supply of aluminium phosphate than Lupinus albus despite releasing fewer carboxylates into the rhizosphere. Journal of New Phytologist, 169:515–24.
30. Rodriguez, H., and R. Fraga. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. A review. Journal of Biotechnology Advances, 17:319–39.
31. Safari Sinegani, A., and T. Rashidi. 2011. Changes in phosphorus fractions in the rhizosphere of some crop species under glasshouse conditions. Journal of Plant Nutrition, 174: 899–907.
32. Samadi, A., and R.J. Gilkes. 1999. Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of South Western Australia. Soil Science Society of America Journal, 63:809–15.

33. Sharma, S., V, Kumar, and R.B. Tripathi. 2011. Isolation of phosphate solubilizing microorganism (PSMs) from soil. Journal of Microbiology and Biotechnology Research, 1: 90-95.
34. Shen, J., R, Li, F. Zhang, J. Fan, C. Tang and Z. Rengel. 2004. Crop yield, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil. Journal of Field Crops Research, 86:225–38.
35. Shen, J., L. Yuan, J. Zhang, H. Li, Z.H. Bai, X. Chen, W. Zhang and F. Zhang. 2011. Phosphorus dynamics: From soil to plant. Journal of Plant Physiology, 156:997–1005.
36. Smith, S.E., and D. J. Read 1997. Mycorrhizal symbiosis. Academic Press, San Diego, CA.1997
37. Tang, C., J.J. Drevon, B. Jaillard, G. Souche, and P. Hinsinger. 2004. Proton release of two genotypes of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by N nutrition of P deficiency. Journal of Plant Soil, 260:59–68.
38. Zhang, F., S. Kang, J. Zhang, R. Zhang, and F. Li. 2004. Nitrogen fertilization on uptake of soil inorganic phosphorus fractions in the wheat root zone. Soil Science Society of America Journal, 68:1890–95.

Effect of Phosphate and Zinc Bio-Treatments on Inorganic Phosphorus Fractionation in Root Zone Soil of Two Cultivars of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.)

M. Mohammadi[1], M. J. Malakouti, K. Khavazi, F. Rejali and M. H. Davoodi

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Shahrekord, Iran; E-mail: m.mohamadi@areeo.ac.ir
Professor of Tarbiat Modares University; E-mail: mjmalakouti@hotmail.com
Professor of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Karaj, Iran; E-mail: kkhavazi@yahoo.com
Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Karaj, Iran; E-mail: frejali@yahoo.com
Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Karaj, Iran; E-mail: Davoodi_mh@yahoo.com

Received: December, 2018 and Accepted: July, 2019

Abstract

In order to study the effect of phosphate and zinc bio-treatments on inorganic P fractionation in two cultivars of bean, an experiment was conducted as factorial in a completely randomized design. The research treatments consisted of two cultivars of bean (Talash and Sadri), four levels of P (P_0: Control, P_1: Use of TSP fertilizer on the basis of soil test, P_2: 50 percentage of TSP + P biofertilizer, and P_3: Use of P biofertilizer), and three levels of Zn (Zn_0: Control, Zn_1: 50 kg ha^{-1} $ZnSO_4$, and Zn_3: Use of biological Zn treatment). The results revealed that there were significant differences between the two cultivars on Ca_2-P, Ca_8-P, Ca_{10}-P and total P. The minimum amount of inorganic P fractions was obtained from root zone soil of Sadri cultivar. The effect of P treatment was significant on inorganic P fractions, except Al-P, Fe-P and O-P. The amount of inorganic P forms showed an increase in P_1 and a decrease in P_2 and P_3 treatments. The effect of Zn treatment was significant on inorganic P fractions, except Al-P and O-P. The minimum amount of inorganic P fractions was obtained from Zn_2. Among the interaction effects, the triple interaction effect of cultivar × P × Zn was significant on Ca_2-P and Ca_{10}-P and the double interaction effect of P × Zn was significant on Ca_2-P، Ca_8-P, Ca_{10}-P and TP. The maximum amounts of these forms were obtained from $C_1P_1Zn_0$ and P_1Zn_0, and the minimum from $C_2P_2Zn_2$, P_2Zn_2 and P_2Zn_3 treatments. Sadri cultivar and phosphate and Zn bio-treatments had higher efficiency in release and uptake of P inorganic forms.

Keywords: Mycorrhiza, Bean cv. Talash and Sadri

[1]. Corresponding author: Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Shahrekoard. P.O.Box: 415