



تأثیر تقسیط فسفر بر کارایی آن و پویایی روی و فسفر در خاک و اندام‌های هوایی دو رقم برنج (هاشمی و گیلانه)

شهرام محمود سلطانی^{۱*}، فاطمه دائمی^۲ و محمدتقی کربلایی آقا ملکی^۳

^۱استادیار، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

^۲دانشجوی دکتری، فیزیولوژی گیاهی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۳استادیار، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، آمل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۶

چکیده

مقدمه و هدف: با وجود اهمیت حیاتی فسفر، بازیافت آن در اغلب خاک‌ها بسیار پایین و از ۲۵ درصد فسفر افزوده شده نیز کم‌تر بوده و باقی‌مانده آن به شکل‌های مختلف در خاک تثبیت و از دسترس گیاه در فصل رشد خارج می‌شود. با وجود مطالعات بسیار در خصوص تأثیر مصرف فسفر به صورت پایه و مخلوط با خاک، مطالعه در زمینه تقسیط فسفر و تأثیر فسفر بر روی عنصر روی در خاک و بافت گیاه با توجه به اثر بازدارندگی این دو عنصر نسبت به هم بسیار نادر است. بنابراین، پژوهش (گلدانی) حاضر با اهداف بررسی تأثیر تقسیط فسفر بر روند تغییرات فسفر و روی قابل جذب در خاک در مراحل مختلف رشد گیاه برنج، تأثیر تقسیط فسفر بر پراکنش عناصر فسفر و روی در اندام‌های گوناگون دو رقم برنج هاشمی (محلی) و گیلانه (اصلاح شده) در مراحل مختلف رشد تدوین و اجرا شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش گلدانی در هوای آزاد به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی موسسه تحقیقات برنج کشور در رشت انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل کود فسفر در پنج سطح، خاک در دو سطح (سیلت لوم و لوم رسی) و دو رقم برنج هاشمی (محلی) و گیلانه (اصلاح شده) می‌باشد. تیمارهای کود فسفر خالص از منبع سوپرفسفات تریپل عبارتند از: بدون مصرف کود (شاهد)، ۱۰۰ درصد مصرف کود فسفر به صورت پایه، تقسیط دو مرحله‌ای کود فسفر (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد پس از ۲۰ روز بعد از نشاکاری)، تقسیط دو مرحله‌ای کود فسفر (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد پس از ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و تقسیط سه مرحله‌ای کود فسفر (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد پس از ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد پس از ۶۰ روز بعد از نشاکاری). محتوای فسفر و روی برگ، ساقه، خوشه و دانه، و محتوای روی خاک در مرحله پنجه‌زنی، گلدهی و رسیدگی اندازه‌گیری شدند.

نتایج: بیش‌ترین فسفر قابل جذب خاک در زمان گلدهی ارقام هاشمی (۹۵/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) و گیلانه (۱۰۹/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) به ترتیب در تیمارهای تقسیط دو مرحله‌ای و دو مرحله‌ای، بیش‌ترین روی قابل جذب خاک در زمان گلدهی برای ارقام هاشمی (۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) و گیلانه (۸/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) به ترتیب در تیمارهای تقسیط دو مرحله‌ای و دو مرحله‌ای، بیش‌ترین محتوای فسفر دانه گیاه برنج برای ارقام هاشمی (۰/۲۵ و گیلانه ۰/۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب در تقسیط‌های پایه و دو مرحله‌ای به‌دست آمد. میزان روی دانه در برخی از تیمارهای تقسیط فسفر در مقایسه با کاربرد فسفر به صورت ۱۰۰ درصد پایه با اختلاف معنی‌داری بیش‌تر بود. همچنین، بیش‌ترین مقدار کارایی زراعی (۱۳/۳ و ۱۲/۷ کیلوگرم

*مستول مکاتبه: shmsoltani@gmail.com

در کیلوگرم)، فیزیولوژیک (۶۹۳/۱ و ۷۴۰/۱ کیلوگرم در کیلوگرم)، فیزیولوژیک - زراعی (۴۸۲ و ۷۵۳ کیلوگرم در کیلوگرم)، بازیافت ظاهری (۷/۲ و ۵/۶۷ کیلوگرم در کیلوگرم)، کارایی مصرف (۱۹۹۸ و ۱۲۷۲/۲ کیلوگرم در کیلوگرم) به ترتیب برای ارقام هاشمی و گیلانه در تیمارهای تقسیط عمدتا دو و سه مرحله‌ای به دست آمد. براساس مدل رگرسیونی چندمتغیره خطی گام به گام متغیرهای غلظت فسفر قابل جذب خاک در مرحله رسیدن دانه، غلظت روی در دانه و غلظت روی در بخش هوایی گیاه در مرحله گلدهی ۵۲ درصد از تغییرات عملکرد دانه را تشریح می‌نمایند.

نتیجه‌گیری: افزایش ۵۴/۷ درصدی روی دانه در رقم هاشمی و در خاک لوم سیلت در تقسیط سه مرحله‌ای و افزایش ۳۷/۵ درصدی در رقم گیلانه و در خاک رس سیلت در تقسیط دو مرحله‌ای نسبت به مصرف پایه (۱۰۰ درصد) کود فسفر نشان‌دهنده تأثیر مثبت و موثر تقسیط نسبت به شرایط عدم تقسیط در بهبود کیفیت دانه است.

واژه‌های کلیدی: برنج، تقسیط کود فسفر، رقم گیلانه، رقم هاشمی، کارایی فسفر.

مقدمه

از کمبود آن‌ها گسترده‌ترین و جدی‌ترین بی‌نظمی‌های تغذیه‌ای را در اراضی شالیزارهای جهان ایجاد کرده و یکی از عوامل مهم کاهش عملکرد در گیاه برنج هستند (۲۱). فسفر یکی از مهم‌ترین عناصر ضروری مورد نیاز گیاهان است که باعث افزایش رشد و قوی‌تر شدن ریشه‌ها، قوی و ضخیم شدن ساقه‌ها، پرحجم شدن دانه‌ها، افزایش میزان عملکرد و زودرسی محصول شده و در عمل تلقیح گل‌ها دخالت دارد (۲۳). روی نیز در تعداد زیادی از فرایندهای فیزیولوژیک رشد گیاه و سازوکارهای سوخت و ساز آن از جمله فعال‌سازی ۳۰۰ آنزیم، سنتز پروتئین‌ها، متابولیسم‌های دخیل در تولید کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها، اکسین و اسیدهای نوکلئیک، بیان ژن و تنظیم لقاح (تشکیل دانه‌گرده) دخالت دارد (۱۰). ولی با وجود اهمیت حیاتی فسفر برای کشت برنج در اراضی شالیزاری، بازیافت آن در خاک‌های کشاورزی بسیار پایین و از ۲۵ درصد فسفر افزوده شده نیز کم‌تر بوده و باقی‌مانده آن به شکل‌های مختلف در خاک تثبیت و یا با ورود به چرخه هیدرولوژیکی از دسترس گیاه در فصل رشد خارج می‌شود (۱۵، ۴۱). در نتیجه بسیار ضروری است تا بتوانیم به راه‌کاری برای تامین مقدار قابل دسترس عنصر در طول فصل زراعی دست یابیم.

برنج (*Oryza sativa* L.) غذای اصلی (۱، ۱۲) و تامین‌کننده ۲۱ درصد از انرژی و ۱۵ درصد از پروتئین مورد نیاز بیش از ۵۰ درصد جمعیت جهان به‌ویژه در کشورهای برنج‌خیز می‌باشد (۱۲). برآوردهای سازمان خواروبار جهانی (فائو) نشان می‌دهد که برای تغذیه جمعیت رو به افزایش جهان به ۷۶۰ میلیون تن شلتوک تا سال ۲۰۲۵ نیاز خواهد بود تا منبع مطمئن غذایی برای ساکنان کشورهای برنج‌خیز جهان تامین گردد، این در حالی است که چشم‌اندازی برای افزایش سطح اراضی شالیزاری متصور نیست (۱۲). اگرچه پنج دهه گذشته عملکرد برنج دو جهش بزرگ (پیشرفت‌های ژنتیکی و به‌زراعی) را به خود دیده و در نتیجه میزان عملکرد دانه برنج به بیش از سه برابر افزایش یافته است (۲۸، ۵۶)، ولی نیاز به افزایش عملکرد محصولات کشاورزی به‌ویژه برنج از یک طرف و ارتقای برخی از عناصر مهم (به ویژه فسفر و روی) در بخش‌های خوراکی محصولات کشاورزی (کاه و دانه) همچنان به‌طور غیرقابل انکاری از نگرانی‌های عمده پژوهش‌گران است (۲۰، ۴۲).

فسفر دومین عنصر پرمصرف و روی مهم‌ترین عنصر کم مصرف می‌باشند که اثرات ناشی

غلظت عناصر جذب شده در بافت‌های گیاهی به ترتیب در ریشه، ساقه، برگ، خوشه و دانه ذخیره می‌شود (۵۱). بنابراین، ضروری است تا به پویایی عناصر در هر دو بخش خاک و درون بافت‌های گیاه برای دستیابی به سازوکارهای بهبود کارایی آنها توجه ویژه نمود. اگرچه کاربرد حاکی عناصر در خاک‌های دارای کمبود، یک راه‌کار کلی، سریع و کم هزینه برای مقابله با کمبود آنها بوده و علاوه بر افزایش عملکرد دانه به افزایش غلظت شان در دانه نیز می‌انجامد (۲۲، ۳۶)، ولی این رویکرد همیشه از دیدگاه اقتصادی مطلوب نبوده و ممکن است به مطالعات اصلاحی تکمیلی نیز نیاز داشته باشد. بنابراین، علاوه بر تامین مقدار فسفر کافی، توجه به زمان مصرف و چگونگی مصرف منطبق با نیاز فیزیولوژیک گیاه و توزیع این عناصر در گیاه به عنوان منابع داخل بافتی این عناصر توجه به تقسیم را نیز در کانون توجه قرار می‌دهد.

مطالعات متعددی بر این نکته تاکید دارند که تقسیم فسفر می‌تواند یکی از راه‌های پیش‌رو برای مقابله با این مشکلات در اراضی شالیزاری باشد. سینق و همکاران (۱۹۸۸) نشان دادند که کاربرد کود فسفر در تقسیم سه مرحله ای به طور معنی‌داری سبب افزایش عملکرد دانه و کاه، تعداد و وزن خوشه، غلظت نیتروژن و جذب آن در برنج در مقایسه با کاربرد پایه‌ای آن شده است در این مطالعه با تقسیم ۸۸ کیلوگرم فسفر در هکتار در سه مرحله ۱۰ درصد افزایش عملکرد دانه و ۱۳ درصد افزایش عملکرد کاه در مقایسه با کاربرد فسفر در یک نوبت مشاهده شد (۵۵). در پژوهشی دیگر توسط آرچانا و همکاران (۲۰۱۶) در هند با تقسیم ۸۵ کیلوگرم در هکتار P_2O_5 در دو مرحله (۵۰ درصد کاربرد پایه و ۵۰ درصد اوایل پنجه‌زنی) افزایشی در حدود ۲۰ درصد

همچنین، مقدار زیاد فسفر در خاک‌های کشاورزی که می‌تواند ناشی از غلظت بالای فسفر بومی و یا کاربرد بیش از حد کودهای فسفاته در اراضی کشاورزی باشد، سبب کاهش غلظت روی شده و در نتیجه باعث بروز علائم کمبود روی در محصولات کشاورزی می‌شود. کمبود روی ناشی از فسفر به دلیل ایجاد عدم تعادل فیزیولوژیکی عناصر غذایی نه تنها بازده اقتصادی محصول برنج را کاهش داده، بلکه غلظت روی محلول موجود در اندام‌های برنج را نیز کاهش می‌دهد. اگرچه بر مقدار کل روی در اندام‌های محصول برنج تأثیر نمی‌گذارد (۱، ۱۷).

برای تأمین کافی هر عنصر ضروری برای رشد مناسب محصولات کشاورزی، گیاهان از دو منبع گوناگون استفاده می‌کنند: منابع بیرونی یعنی جذب از طریق خاک و اندام‌های هوایی و یا منابع داخلی ناشی از متحرک‌سازی (رها سازی) مجدد این عناصر در بافت‌های گیاهی در مراحل مختلف رشد برحسب نیاز گیاه (۵۰). منبع اول با کاربرد راهبردهای به‌زراعی همانند افزایش شکل‌های در دسترس این عناصر در خاک با مصرف منابع قابل جذب آنها شکل می‌گیرد (۵۰). منبع دوم مخازن زیستی قابل استفاده مجدد این عناصر در بافت‌های گیاهانی پیش از زمان گلدهی بوده که پویایی آنها به روابط بین غلظت این عناصر در خاک، غلظت کل آنها در گیاه و غلظت‌شان در تک‌تک بافت‌های گیاهان زراعی بستگی دارد (۲۵). میزان جذب، ذخیره و رها سازی دوباره عناصر توسط اندام‌های گوناگون گیاهی برابر و یکسان نیست، چرا که گیاه قادر است عناصر را نه تنها از طریق ریشه بلکه توسط اندام‌های هوایی نیز جذب کرده و به شکل ترکیبات پیچیده آلی در بخش‌های گوناگون بافتی خود ذخیره نماید. معمولاً بیش‌ترین میزان

1. Remobilization

خوشه و تشکیل دانه به فسفر می‌باشد. در مرحله رسیدگی دانه بالاترین غلظت فسفر به ترتیب ۰/۱۳ درصد برای رقم هاشمی و ۰/۱۲ درصد برای رقم گیلانه، در ساقه به ترتیب ۰/۰۸ درصد برای رقم هاشمی و ۰/۱۱ درصد برای رقم گیلانه، در ریشه برای رقم هاشمی ۰/۱۵ درصد و برای رقم گیلانه ۰/۱۳ درصد، در خوشه به ترتیب ۰/۶۴ درصد برای رقم هاشمی و ۰/۶۶ درصد برای رقم گیلانه بود (۴۰). افزایش غلظت فسفر در خوشه به دلیل نیاز شدید گیاه در مرحله شروع خوشه و تشکیل دانه به فسفر می‌باشد (۴۱).

با وجود مطالعات بسیار در خصوص تأثیر مصرف فسفر به صورت پایه و مخلوط با خاک (۱۸، ۶۱)، مطالعه در زمینه تقسیط فسفر و اثر متقابل فسفر و روی با توجه به اثر بازدارندگی این دو عنصر نسبت به هم (۳۲، ۳۴) بسیار نادر است. بنابراین، پژوهش (گلدانی) حاضر با اهداف بررسی تأثیر تقسیط فسفر بر روند تغییرات فسفر و روی قابل جذب در خاک در مراحل مختلف رشد گیاه برنج، تأثیر تقسیط فسفر بر پراکنش عناصر فسفر و روی در اندام‌های گوناگون دو رقم برنج هاشمی (محلی) و گیلانه (اصلاح شده) در مراحل مختلف رشد تدوین و اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به صورت کاشت گلدانی گیاه برنج در هوای آزاد در بهار و تابستان سال ۱۳۹۷ در موسسه تحقیقات برنج کشور، رشت انجام شد. در این آزمایش، براساس نتایج ثبت شده در بانک اطلاعاتی بخش تحقیقات خاک و آب موسسه تحقیقات برنج کشور، ۲۰ نمونه از خاک‌های شالیزاری استان گیلان و با گستره خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت، انتخاب و نمونه‌برداری شدند.

در عملکرد دانه را گزارش کرده‌اند (۳). نتایج مشابهی برای تقسیط‌های دو و سه مرحله‌ای توسط یادآو و همکاران (۲۰۰۴) نیز گزارش شده است (۵۰). بابو و همکاران (۲۰۰۵)، مینا و همکاران (۲۰۱۴)، کومار و همکاران (۲۰۱۵) و آرچانا و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که علاوه بر افزایش عملکرد و یا عدم افزایش عملکرد، با تقسیط کود فسفره می‌توان میزان کوددهی مزارع کشاورزان را تا ۲۵ درصد هم کاهش داد که این به اقتصاد کشاورزان تولیدکننده برنج کمک شایانی می‌کند (۳، ۴، ۷، ۵۹).

محمود سلطانی و همکاران (۲۰۱۷، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰) نشان دادند که بیش‌ترین غلظت روی جذب شده توسط گیاه برنج در مرحله پنجه‌زنی به ترتیب در ریشه، ساقه و برگ، و در مرحله گلدهی در ریشه، ساقه، خوشه و برگ و در مرحله رسیدن دانه نیز به ترتیب در ریشه، ساقه، دانه، خوشه و برگ دیده می‌شود (۳۶، ۳۹، ۴۰). روند تغییر جایگاه برگ می‌تواند به دلیل رهاسازی دوباره این عنصر توسط برگ و انتقال به نقاط هدف مانند خوشه در مرحله گلدهی و خوشه و دانه در زمان پرشدن آن باشد (۵۱). همچنین، محمود سلطانی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که در مرحله گلدهی بالاترین غلظت فسفر در برگ به ترتیب ۰/۲۷ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم هاشمی و ۰/۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم گیلانه، در ساقه به ترتیب ۰/۱۹ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم هاشمی و ۰/۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم گیلانه در ریشه به ترتیب ۰/۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم هاشمی و ۰/۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم گیلانه، در خوشه به ترتیب ۰/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم هاشمی و ۰/۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم برای رقم گیلانه بود. به نظر می‌رسد که افزایش غلظت فسفر در خوشه به دلیل نیاز شدید گیاه در مرحله شروع

سوپرفسفات تریپل براساس تیمارهای آزمایش به خاک افزوده و به خوبی با آن مخلوط گردید. همچنین، کود روی به مقدار ۲۰ کیلوگرم روی در هکتار از منبع سولفات روی ۲۲ درصد نیز پیش از نشا به خاک افزوده شد. پس از غرقاب نمودن و گلخراب کردن خاک‌های گلدان‌ها و قرار دادن آب به ارتفاع پنج سانتی‌متر از سطح خاک، نشاکاری در هر گلدان به شکل سه گیاهچه‌ای برای هر دو رقم برنج هاشمی و گیلا نه انجام شد. تیمارهای آزمایش عبارتند از: P₁ (بدون مصرف کود؛ شاهد)، P₂ (۱۰۰ درصد مصرف کود فسفر به صورت پایه)، P₃ (تقسیم دو مرحله‌ای کود فسفر؛ ۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری)، P₄ (تقسیم دو مرحله‌ای کود فسفر؛ ۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و P₅ (تقسیم سه مرحله‌ای کود فسفر؛ ۵۰ درصد پایه و ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری). کلیه عملیات داشت مانند مبارزه با آفات، بیماری‌ها، وجین و آبیاری طبق روش‌های توصیه شده توسط موسسه تحقیقات برنج کشور در کلیه گلدان‌ها به صورت یکسان اعمال شد.

نمونه‌های خاک در معرض هوا خشک شدند و پس از عبور دادن از الک دو میلی متری، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری گردید. از بین نمونه‌ها دو نمونه خاک لومی-سیلتی و رسی-سیلتی با فسفر قابل جذب کم‌تر از آستانه بحرانی انتخاب و برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱). مقدار آستانه بحرانی فسفر قابل جذب خاک در اراضی شالیزاری ۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک می‌باشد (۴۱). دو نمونه خاک انتخابی هوا خشک و خرد شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شده و به مقدار ۲۰ کیلوگرم در گلدان‌های پلاستیکی با حجم ۲۹ لیتر ریخته شدند. کود پتاسیم به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم اکسید پتاسیم (K₂O) در هکتار از منبع سولفات پتاسیم پیش از نشاکاری به کلیه گلدان‌ها اضافه شد. کود نیتروژن به مقدار ۶۰ و ۷۵ کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به ترتیب برای رقم هاشمی و گیلا نه و در سه مرحله پیش از نشاکاری، در مرحله وجین و در مرحله تشکیل جوانه اولیه خوشه به گلدان‌ها افزوده گردید. کود فسفره نیز به مقدار ۴۵ کیلوگرم در هکتار پتتا اکسید فسفر (P₂O₅) از منبع

جدول ۱ - ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش.

Table 1- Physical and chemical properties of selected soils.

نوع خاک	رس (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	هدایت الکتریکی در عصاره اشباع	اسیدیته گل اشباع	کربن آلی (درصد)	نیتروژن کل (درصد)	روی قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم)
Soil Types	Clay (%)	Sand (%)	Silt (%)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	Organic carbon (%)	Total N (%)	Available Zn (mg.kg ⁻¹)	Available K (mg.kg ⁻¹)	Available P (mg.kg ⁻¹)
سیلت لوم Silt Loam	24	23	53	0.51	7.18	1.35	0.1	2.1	75	3.1
سیلت رس Silty Clay	46	8	46	0.62	6.53	2.02	0.2	6.2	95	6.9

فسفر اندام‌های مختلف مانند برگ، ساقه، خوشه به روش هضم تر و محتوای فسفر خاک نیز با روش

در طول مراحل گوناگون رشد گیاه برنج (حداکثر پنجه‌زنی، گلدهی و پرشدن دانه) محتوای

اولسون و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (۴۶)، (۴۷) اندازه‌گیری شد. محتوای روی خاک و محتوای روی اندام هوایی در مرحله پنجه‌زنی، گلدهی و رسیدگی نیز با استفاده از روش DTPA و به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (۳۲). همچنین انواع کارایی‌های زراعی، فیزیولوژیک، مصرف و همچنین، کارایی بازیافت ظاهری کود فسفره مصرفی نیز براساس روابط زیر محاسبه شدند (۲۶).

کارایی زراعی فسفر (AE): کارایی زراعی به صورت تولید اقتصادی به‌دست آمده در ازای هر واحد فسفر مصرف شده تعریف می‌شود و به صورت زیر محاسبه شد:

$$AE = (Gf - Gu) / Pa$$

که در این معادله $Gu =$ عملکرد دانه در تیمار عدم مصرف کود (گیلوگرم)، $Gf =$ عملکرد دانه در تیمار مصرف کود (کیلوگرم) و $Pa =$ مقدار فسفر مصرف شده (کیلوگرم)

کارایی فیزیولوژیک فسفر (PE): کارایی فیزیولوژیک به صورت تولید بیولوژیکی به‌دست آمده در واحد جذب فسفر تعریف می‌شود و به صورت زیر محاسبه شد:

$$PE = (BYf - BYu) / (Pf - Pu)$$

که در این معادله، $GYf =$ عملکرد بیولوژیک (دانه + کاه و کلش) در تیمار کود داده شده (کیلوگرم)، $BYu =$ عملکرد بیولوژیک (دانه + کاه و کلش) در تیمار کود داده نشده (کیلوگرم)، $Pf =$ جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در تیمار کود داده شده (کیلوگرم) و $Pu =$ جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در تیمار کود داده نشده (کیلوگرم).

کارایی بازیافت ظاهری فسفر (ARE): کارایی بازیافت ظاهری به صورت مقدار عنصر غذایی جذب شده به ازای هر واحد از عنصر غذایی به‌کار رفته تعریف می‌شود و به صورت زیر محاسبه شد:

$$ARE (\%) = [(Pf - Pu) / Pa] \times 100$$

که در این معادله، $Pf =$ جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در تیمار کود داده شده (کیلوگرم)، $Pu =$ جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در تیمار کود داده نشده (کیلوگرم) و $Pa =$ مقدار فسفر مصرف شده (کیلوگرم)

کارایی مصرف فسفر: کارایی مصرف فسفر از حاصل ضرب کارایی فیزیولوژیکی و کارایی بازیافت ظاهری به‌دست می‌آید و به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$UE = PE \times ARE \text{ (کارایی فیزیولوژیکی)}$$

(بازیافت ظاهری)

کارایی فیزیولوژیک - زراعی: کارایی فیزیولوژیک - زراعی به صورت تولید اقتصادی به‌دست آمده در واحد جذب عنصر غذایی تعریف شده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$APE (kgkg^{-1}) = (Gf - Gu) / (Pf - Pu)$$

در این رابطه Gf, Gu, Pf و Pu عبارتند از عملکرد دانه در گلدان کود داده شده (کیلوگرم)، عملکرد دانه در گلدان کود داده نشده (کیلوگرم)، جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در گلدان کود داده شده (کیلوگرم) و جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در گلدان کود داده نشده (کیلوگرم)؛ $Gfm =$ عملکرد دانه در گلدان کود داده شده (کیلوگرم)، $Gu =$ عملکرد دانه در گلدان کود داده نشده (کیلوگرم) و $Pf =$ جذب فسفر (دانه + کاه و کلش) در گلدان کود داده شده.

پس از اندازه‌گیری و گردآوری داده‌ها با استفاده از آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف نرمال بودن داده‌ها بررسی شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SAS انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با نرم‌افزار SAS و با استفاده از روش حداقل اختلافات معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای ترسیم شکل‌ها و برازش منحنی‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

Table 2- The analysis of variance of the soil P and Zn concentration, and P and Zn content of rice aerial tissues and grain at different rice growth stages on two rice varieties (Hashemi and Guilaneh) under P splitting treatments.

منابع تغییر S.O.V	df	میانگین مربعات Mean Squares										ZS1	ZS2	ZS3	ZAI	ZA2	ZG	ZS1	PS1	PS2	PS3	PA1	PA2	PG							
		PS1	PS2	PS3	PA1	PA2	PG	PS1	PS2	PS3	PA1														PA2	PG					
تکرار Replication	2	0.000ns	0.000ns	0.00ns	0.00ns	6.56ns	10.22ns	27.60ns	0.07ns	7.55ns	48.98ns	0.05ns	0.06ns	0.033ns																	
رقم Variety	1	0.005**	0.000ns	0.001**	27.24**	412.45**	63.44**	40.77**	0.89ns	294.63**	5.31**	2.89**	30.70**																		
بافت خاک Soil type	1	0.0001**	0.002**	0.001**	4.35**	378.85**	175.1**	73.75**	470.3**	28.31ns	14.42**	0.05ns	146.1**																		
فسفر Phosphorus	4	0.007**	0.001**	0.001**	744.14**	7908.89**	6307.67**	9.87**	70.81**	491.52**	6.73**	4.70**	1.50ns																		
رقم × بافت خاک Soil texture × Variety	1	0.002**	0.002**	0.00ns	50.34**	84.24ns	631.80**	0.00ns	0.86ns	2371.01**	2.61**	1.23*	3.60*																		
رقم × فسفر Variety × Phosphorous	4	0.002**	0.001**	0.001**	96.91**	299.85**	3491.16**	26.92**	66.9**	215.51**	3.90**	7.34**	4.13**																		
خاک × تیمار Soil texture × Phosphorous	4	0.002**	0.00 ns	0.001**	18.9ns	964.86**	138.38**	13.61**	135.6**	836.4**	2.33**	7.25**	7.13**																		
رقم × خاک × فسفر Variety × Soil texture × Phosphorous	4	0.009**	0.001**	0.003**	129.07**	39.99ns	448.99**	47.08**	81.07**	712.88**	5.84**	4.34**	1.07ns																		
خطا Error	38	0.000	0.00	0.00	13.54	39.92	15.39	0.80	11.32	17.31	0.03	0.22	0.78																		
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		2.7	4.37	4.62	13.55	9.90	8.47	4.94	17.02	11.19	3.93	6.59	11.12																		

PS1, PS2, PS3, PA1, PA2, PG, ZS1, ZS2, ZS3, ZAI, ZA2 and ZG are soil available phosphorus at maximum tillering stage of rice plant, soil available phosphorus at flowering stage of rice plant, soil available phosphorus at ripening stage of rice plant, phosphorous content of rice grain, phosphorous content of aerial part at flowering stage of rice plant, phosphorous content of rice grain, soil available zinc at ripening stage of rice plant, soil available zinc at flowering stage of rice plant, soil available zinc at ripening stage of rice plant, zinc content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, zinc content of aerial part at flowering stage of rice plant, zinc content of rice grain, respectively.

ns, * and ** are no significant, significant at 5 and 1 percent confidence levels, respectively.

*** are no significant, significant at 1 percent confidence levels, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین های محتوای فسفر خاک، محتوای فسفر اندام هوایی گیاه و محتوای فسفر دانه در دو رقم برنج (هاشمی و گیلانه) در تیمارهای تقسیم فسفر.

Table 3- The mean comparison of the soil P concentration, and P content of rice aerial tissues and grain at different rice growth stages on two rice varieties (Hashemi and Guilaneh) under P splitting treatments.

تیمارهای آزمایشی Experimental Treatments			صفات اندازه گیری شده Measured Characters					
			PG	PA2	PA1	PS3	PS2	PS1
ارقام برنج Rice Varieties	بافت خاک Soil Texture	تقسیم فسفر P splitting	میلی گرم در کیلوگرم (mg.kg ⁻¹)					
هاشمی Hashemi	سیلتی لوم Silt Loam	P ₁	0.09k	0.27ab	0.21fghi	10.80i	23.60k	19.7j
		P ₂	0.10j	0.24de	0.23bcd	32.20bc0de	68.90fg	122.26a
		P ₃	0.15e	0.26cd	0.19j	24.70ghf	95.30b	37.6g
		P ₄	0.17d	0.26cd	0.23bcde	23.50gh	53.70h	36.6g
		P ₅	0.13g	0.22ef	0.20defg	30.30cdef	70.90efg	45.4ef
	سیلتی رس Silty Clay	P ₁	0.14f	0.23e	0.22defg	8.80i	32.2ij	15.2k
		P ₂	0.25a	0.26cd	0.22efg	27.23defg	89.10bcd	101.1b
		P ₃	0.17d	0.29a	0.24ab	34abc	79.03def	30hi
		P ₄	0.13g	0.22ef	0.23bcdef	25.40fgh	34.20ij	24.5ji
		P ₅	0.12h	0.25cd	0.20ij	32.50bcd	63.30gh	40.20fg
گیلانه Guilaneh	سیلتی لوم Silt Loam	P ₁	0.09k	0.21f	0.21ghi	13.30i	28.20jk	17.90k
		P ₂	0.19c	0.25cd	0.23cdef	26.30ghf	61.48gh	33.90hg
		P ₃	0.12h	0.25cd	0.21fgh	38a	109.6a	63.4c
		P ₄	0.20b	0.23de	0.25ab	36abc	61.10gh	49.6de
		P ₅	0.13g	0.26bc	0.22cdefg	38.70a	90.10bc	54d
	سیلتی رس Silty Clay	P ₁	0.08l	0.27ab	0.22cdef	20.50h	25.10jk	18.16jk
		P ₂	0.07m	0.26bc	0.24cd	27.40defg	83.50cd	68.3c
		P ₃	0.13g	0.25cd	0.26a	24.50fgh	80.50de	48.2de
		P ₄	0.14f	0.27ab	0.22defg	37.50ab	41.40i	50.80de
		P ₅	0.11i	0.27ab	0.23cdef	30.50cdef	82.80cd	48.60de

PS1, PS2, PS3, PA1, PA2, PG به ترتیب عبارت اند از: فسفر قابل استفاده خاک در مرحله پنجه زنی گیاه برنج، فسفر قابل استفاده خاک در مرحله گل دهی گیاه برنج، فسفر قابل استفاده خاک در مرحله رسیدگی گیاه برنج، فسفر اندام هوایی در مرحله پنجه زنی گیاه برنج، فسفر اندام هوایی در مرحله گل-دهی گیاه برنج و محتوای فسفر دانه برنج.

میانگین هایی که در هر ستون، دارای حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون LSD، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.

PS1, PS2, PS3, PA1, PA2 and PG are soil available phosphorus at maximum tillering stage of rice plant, soil available phosphorus at flowering stage of rice plant, soil available phosphorus at ripening stage of rice plant, phosphorous content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, phosphorous content of aerial part at flowering stage of rice plant, and phosphorous content of rice grain, respectively.

Means in each column, followed by similar letters are not significantly different at the 5% probability level- LSD Test

خاک سیلتی لومی در افزایش فسفر قابل جذب آن تاثیرگذارتر از مقدار رس باشد. ژنگ و همکاران (۲۰۰۳) بیان داشتند که با افزایش میزان رس (سنگین تر شدن بافت خاک) و در نتیجه افزایش گنجایش بافری، خاک، فسفر بیش تری را در خود تثبیت کرده و مقدار فسفر قابل جذب کم تری در اختیار گیاه برای رشد قرار می دهد (۶۳). محمودسلطانی و همکاران (۲۰۱۱) نیز در بررسی

فسفر و روی قابل جذب خاک: نتایج اولیه تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد بررسی (جدول ۱) نشان داد که مقدار فسفر قابل جذب آن ها کم تر از حد بحرانی فسفر در اراضی شالیزاری (۱۲ میلی گرم در کیلوگرم (۳۶)) بود و خاک ها دچار کمبود فسفر قابل جذب هستند. اگرچه انتظار می رفت خاک سیلتی رسی دارای مقدار فسفر قابل جذب کمتری باشد ولی به نظر می رسد که بالاتر بودن مواد آلی در مقایسه با

احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی دار بود. این در حالی است که در مرحله گلدهی نیز به استثنای برهم کنش رقم در بافت خاک و بافت خاک در فسفر، و در مرحله رسیدن دانه نیز به استثنای رقم و برهم کنش رقم در بافت خاک و بافت خاک در فسفر تأثیر سایر عامل‌ها و اثر متقابلشان بر محتوای فسفر قابل جذب خاک در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی دار بود.

شکل‌های گوناگون فسفر در اراضی شالیزاری بر تأثیر بافت بر میزان فسفر قابل جذب تأکید داشته و بیان کردند که با افزایش میزان رس خاک، از مقدار فسفر قابل جذب به طور معنی داری کاسته می‌شود، ولی با افزایش مقدار مواد آلی و در نتیجه افزایش فسفر آلی این کاهش تا حدی جبران می‌گردد (۳۸). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی (رقم، بافت خاک و فسفر) و اثر متقابل آن‌ها بر محتوای فسفر خاک در مرحله پنجه‌زنی در سطح

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های محتوای روی خاک، محتوای روی اندام هوایی گیاه و محتوای روی دانه در دو رقم برنج (هاشمی و گیلانه) در دو نوع خاک (رس سیلت و لوم سیلت) در تیمارهای کود فسفر

Table 4- The mean comparison of the soil Zn concentration, and Zn content of rice aerial tissues and grain at different rice growth stages on two rice varieties (Hashemi and Guilaneh) under P splitting treatments.

تیمارهای آزمایشی Experimental Treatments			صفات اندازه گیری شده Measured Characters						
			ZG	ZA2	ZA1	ZS3	ZS2	ZS1	
ارقام برنج Rice Varieties	بافت خاک Soil Texture	تقسیم فسفر P splitting	(mg.kg ⁻¹) میلی گرم در کیلوگرم						
			P ₁	17.6fg	14.5gh	17.2h	7.04a	7.1ef	9.7bc
			P ₂	15.9hi	14.22gh	48.2bcd	5m	8.1bcd	9.9b
			P ₃	18.1ef	16.9efgh	19.3h	2.5n	6.4fg	9.4bc
			P ₄	24.1a	17.1efgh	35.5ef	3.5j	8.6bc	13.09a
	هاشمی Hashemi	سیلتی لوم Silt Loam	P ₅	24.6a	20.7cdef	37.7f	6.8b	6.2g	10.1b
			P ₁	16.3ghi	25.5bc	40.2ef	3.5b	6.3fg	7.9def
			P ₂	21.7b	18.8efgh	20.3h	2.6n	10.1a	6.5fhg
			P ₃	18.2ef	26.3b	52.7b	3.3k	5.9gh	5.5hi
			P ₄	17.2fgh	24.4bcd	50.7bc	3.3k	7.2e	6.7fgh
گیلانه Guilaneh	سیلتی رس Silty Clay	P ₅	15.9hi	16.8efgh	68.6a	3.4jk	7.8cde	7.3efg	
		P ₁	18.7def	16.8efgh	54.7b	4.6f	6.2g	6.8fgh	
		P ₂	19.5de	17.1efgh	43.3def	4.8e	6.4fg	8.4de	
		P ₃	21.2bc	19.3efgh	37f	3.7i	8.7b	9.5bc	
		P ₄	18.4def	15.3fgh	28.3g	5.7c	6.2g	8.7bcde	
	سیلتی لوم Silt Loam	P ₅	14.3j	20.7cdef	39.3ef	4.5f	8.1bcd	9bcd	
		P ₁	15.5ij	21.4bcde	20.8h	3.1l	8.3bcd	6.6fgh	
		P ₂	14.4j	24.1bcd	2.4gh	4.4b	7.6de	6.3gh	
		P ₃	19.8cd	16.6efgh	16.6h	3.1l	4.8i	5.4hi	
		P ₄	15.3ij	37.9a	45.1cde	3.1l	5.3hi	5.4hi	
سیلتی رس Silty Clay	P ₅	16.1hi	12.6h	41.7def	3.9b	7.1cde	6.1ghi		

ZG و ZA2 ، ZA1 ، ZS3.ZS2 ZS1 به ترتیب عبارت اند از: روی قابل استفاده خاک در مرحله پنجه‌زنی گیاه برنج، روی قابل استفاده خاک در مرحله گل‌دهی گیاه برنج، روی قابل استفاده خاک در مرحله رسیدگی گیاه برنج، روی اندام هوایی در مرحله پنجه‌زنی گیاه برنج، روی اندام هوایی در مرحله گل‌دهی گیاه برنج و محتوای روی دانه برنج.

میانگین‌هایی که در هر ستون، دارای حرف مشترک می‌باشند، بر اساس آزمون LSD، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.

ZS1, ZS2, ZS3, ZA1, ZA2 and ZG are soil available zinc at maximum tillering stage of rice plant, soil available zinc at flowering stage of rice plant, soil available zinc at ripening stage of rice plant, zinc content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, zinc content of aerial part at flowering stage of rice plant, and zinc content of rice grain, respectively.

Means in each column, followed by similar letters are not significantly different at the 5% probability level- LSD Test.

از خود بروز می‌دهند. اگرچه خاک‌های سیلت رسی به دلیل رس و مواد آلی بیش‌تر همچنان تحت تأثیر مصرف ۱۰۰ درصدی کود فسفره به‌صورت پایه می‌باشند، ولی خاک سیلت لوم دارای بالاترین میزان فسفر قابل جذب در تیمار تقسیط دو مرحله (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) است. نتایج مربوط به فسفر قابل جذب در مرحله رسیدن دانه حاکی از روند افزایشی مقدار فسفر قابل جذب با افزایش تعداد تقسیط‌ها بود و با روند افزایش خطی از شاهد تا تقسیط سه مرحله‌ای، تقریباً در هر دو بافت خاک و هر دو رقم برنج حداکثر فسفر قابل جذب در تیمار تقسیط سه مرحله‌ای دیده شد. بررسی الگوی جذب تجمعی فسفر در شرایط مختلف آب و هوایی برای گیاه برنج نشان داد که اگرچه جذب آرام و تدریجی فسفر قابل جذب از ابتدای نشای گیاهچه برنج رخ داد، ولی در بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ روز پس از نشای گیاهچه، به حداکثر خود رسید. بنابراین، ضروری است در این بازه زمانی به منظور جلوگیری از تأثیر منفی کمبود فسفر قابل جذب، فسفر در بخش محلول و قابل تبادل در خاک به اندازه کافی وجود داشته باشد (۴۱). با توجه به اینکه بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ روز پس از نشای گیاه منطبق بر تقسیط دو یا سه مرحله‌ای کود فسفر می‌باشد، این روش می‌تواند به افزایش و حفظ سطح فسفر قابل جذب مورد نیاز گیاه در خاک کمک شایانی کند. بعد از کودپاشی به‌صورت ۱۰۰ درصد پایه، در حدود ۵۰ درصد فسفر افزوده شده قبل از ۱۲ روز و ۷۰ درصد آن در حدود دو ماه (شروع مرحله زایشی گیاه برنج) از دسترس گیاه خارج می‌شود (۳۶). زیرا ترکیبات دارای فسفر حلالیت بسیار کمی در خاک دارند و تمایل واکنش‌های تعادلی آن‌ها به سمت فاز جامد است. بنابراین، میزان فسفر در محلول خاک بسیار کم است و زمانی که ترکیبات محلول فسفر به خاک

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین‌های مقادیر فسفر قابل جذب در خاک (جدول ۳) نشان داد که بیش‌ترین فسفر قابل جذب خاک در مرحله پنجه‌زنی گیاه برنج برای هر دو رقم هاشمی (۱۲۲/۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و گیلانه (۶۸/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در تیمار مصرف پایه (۱۰۰ درصد) و به ترتیب در خاک سیلت لوم و سیلتی رس به ثبت رسید، این در حالیست که بیش‌ترین فسفر قابل جذب خاک در زمان گلدهی و در خاک لوم سیلت برای ارقام هاشمی (۹۵/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و گیلانه (۱۰۹/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در تیمار تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسیدند. همچنین، مرحله رسیدن دانه بیش‌ترین فسفر قابل جذب خاک در رقم هاشمی (۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) و بافت سیلت رس در تیمار تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) و برای رقم گیلانه در خاک سیلت لوم (۳۸/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) و تقسیط سه مرحله‌ای کود فسفر (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری، ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسیدند. همچنین، بررسی روند تغییرات فسفر قابل جذب خاک تحت تأثیر تیمارهای تقسیط فسفر در مراحل مختلف رشد گیاه برنج نشان می‌دهد در مرحله پنجه‌زنی حداکثر فسفر قابل جذب در هر دو بافت خاک و هر دو رقم برنج باستثنای یک مورد مربوط به تیمار مصرف ۱۰۰ فسفر به‌صورت پایه است. از آنجایی که تا پیش از مرحله پنجه‌زنی بیش‌ترین مقدار فسفر ورودی به خاک توسط تیمار مصرف ۱۰۰ فسفر به‌صورت پایه انجام می‌شود، این روند کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. این درحالی است که در مرحله گلدهی و اعمال برخی از تیمارهای دو مرحله‌ای تقسیط فسفر خاک‌های مورد مطالعه رفتار متفاوتی را

جذب و نگهداری کم‌تری برای روی قابل تبادل داشته و روی محلول نیز به آسانی از خاک شسته شده و خارج می‌شود (۳۲).

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمارهای کاربردی به استثنای فسفر و همه اثرات متقابل آن‌ها به استثنای رقم در خاک در فسفر بر محتوای روی خاک در مرحله پنجه‌زنی در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی‌دار بود. این در حالی است که در مرحله گلدهی نیز به استثنای بافت خاک و در مرحله رسیدن دانه نیز همه عامل‌ها و اثر متقابلشان بر محتوای روی قابل جذب خاک در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی‌دار بود. نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) نشان داد که بیش‌ترین روی قابل جذب خاک در مرحله پنجه‌زنی گیاه برنج برای ارقام هاشمی (۱۳/۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و گیلا نه (۹/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک سیلت لوم و به ترتیب در تقسیم‌های دو مرحله‌ای کود فسفر (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسیدند.

این در حالی است که بیش‌ترین روی قابل جذب خاک در زمان گلدهی و برای ارقام هاشمی در خاک سیلتي رس (۱۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و گیلا نه (۸/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در خاک سیلت لوم به ترتیب در تیمارهای مصرف پایه و و تقسیم دو مرحله‌ای کود فسفر (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسیدند. همچنین، در مرحله رسیدن دانه برای رقم هاشمی (۶/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) و رقم گیلا نه (۵/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) هر دو در خاک سیلت لوم و به ترتیب در تیمار تقسیم سه مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰

اضافه می‌شود، به اشکال کم‌محلول و یا غیرمحلول تبدیل شده و در نتیجه قابلیت استفاده از آن توسط گیاه کم می‌شود (۲۷). بنابراین، وقتی فسفر ۱۰۰ درصد به شکل پایه به گیاه داده می‌شود در زمان‌های ۱۲ و ۶۰ روز بعد از کودپاشی از دسترس گیاه خارج می‌شود و هنگامی که در این بازه‌های زمانی یعنی در اوایل پنجه‌زنی و شروع مرحله زایشی به خاک فسفر مکمل افزوده می‌شود، محتوای فسفر قابل جذب در خاک افزایش می‌یابد.

نتایج اولیه تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی (جدول ۱) نشان داد که مقدار روی قابل جذب در هر دو خاک بیش‌تر از حد بحرانی روی در اراضی شالیزاری (۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) (۱۱) بوده و خاک‌ها دچار کمبود روی قابل جذب نیستند. با این حال، به دلیل قرار گرفتن یکی از خاک‌ها در حد مرزی کمبود (۲/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) و همچنین، تجربه دریافت پاسخ در خاک‌هایی با مقدار روی تا ۶ میلی‌گرم در کیلوگرم به هر دو خاک، مقدار ۲۰ کیلوگرم روی در هکتار افزوده شد. به‌طور کلی، خاک سیلتي رسی دارای مقدار روی قابل جذب بیش‌تری نسبت به خاک سیلتي لوم است و به‌نظر می‌رسد که بالاتر بودن مواد آلی و مقدار رس خاک سیلتي رسی در مقایسه با خاک سیلتي لومی در افزایش روی قابل جذب آن تاثیرگذار است. اگرچه مقدار روی کل در خاک یک شاخص از ظرفیت بالقوه خاک برای تامین روی کافی بوده و بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار روی قابل جذب خاک ایفا می‌کند (۵۲)، ولی وجود ماده آلی کافی در خاک با تولید کمپلکس‌های آلی روی و روی‌های آلی قابل جذب سبب افزایش فراهمی روی در خاک می‌شوند (۱۶). از طرف دیگر، مطالعات نشان می‌دهد که با کاهش مقدار رس (یا افزایش شن) و سبک‌تر شدن خاک مقدار روی نیز کاسته می‌شود. چرا که خاک توانایی

روز بعد از نشاکاری) دیده شده است. همچنین، بررسی روند تغییرات روی قابل جذب خاک تحت تأثیر تیمارهای تقسیط فسفر در مراحل مختلف رشد گیاه برنج نشان می‌دهد که روند تغییرات در خاک‌های مورد بررسی و فارغ از نوع رقم تقریباً یکسان است. این بدین معنی است که در تمام مراحل رشد تیمارهای فسفر ۱۰۰ درصد پایه و تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۲۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) به دلیل افزایش مقدار فسفر قابل جذب خاک در مقایسه با سایر تیمارها منجر به کاهش شدیدتر مقدار روی قابل جذب خاک شد. به نظر می‌رسد که مناسب‌ترین تیمار فسفر برای حفظ محتوای روی خاک و با توجه به تامین مناسب فسفر برای رشد گیاه، تقسیط سه مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) است. اگرچه برخی از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد در حالی که فسفر بر عملکرد متابولیک روی به‌وسیله بروز عدم تعادل در نسبت فسفر / روی در سلول‌های گیاهی اثر می‌گذارد ولی کمبود روی هیچ ارتباطی با فسفر ندارد (۳۲). نتایج تعداد بسیاری از پژوهش‌ها حاکی از این است که فراهمی روی خاک با تشکیل کربنات، سولفیدها، فسفات، و هیدروکسیدهای روی نامحلول کاهش یافته است. همچنین، تشکیل فسفات مواد معدنی، مانند آپاتیت (فسفات کلسیم)، می‌تواند روی شدت جذب و کاهش روی قابل جذب و روی لبایل تأثیر بگذارد (۱). روی قابل استخراج با DTPA همبستگی منفی معنی‌داری با فسفر قابل دسترس نشان داده است و در نتیجه، مصرف بیش از حد کود فسفر سبب کمبود روی در خاک شده است (۴۴). بنابراین، مصرف یک‌باره (۱۰۰ درصد پایه) و یا با تقسیط با فاصله کم (تقسیت دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۲۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری)) می‌تواند به کاهش مقدار روی

خاک انجامیده ولی هرگاه در مقدار مساوی فسفر مصرفی فاصله تقسیط‌ها بیش‌تر شود تأثیری بر کاهش آن ندارد.

محتوای فسفر و روی در بخش هوایی (کاه): نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمارهای کاربردی به استثنای بافت خاک و همه اثرات متقابل آن‌ها بر محتوای روی بخش هوایی گیاه (کاه) در مرحله پنجه‌زنی در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی‌دار بود. این در حالی است که در مرحله گلدهی نیز اثر تیمارهای کاربردی به استثنای رقم و اثرات متقابل تیمارها به استثنای رقم در بافت خاک بر محتوای روی بخش هوایی گیاه در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی‌دار بود.

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) نشان داد که بیش‌ترین محتوای فسفر گیاه در مرحله پنجه‌زنی گیاه برنج برای ارقام هاشمی (۰/۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) و گیلانه (۰/۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) هر دو در خاک سیلت رس و به ترتیب در تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) و تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسیدند. این در حالیست که بیش‌ترین محتوای فسفر در بخش هوایی (کاه) در زمان گلدهی برای رقم هاشمی و گیلانه هر دو در خاک سیلت رس و به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۲۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و به ترتیب در تیمارهای در تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) و تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و به ثبت رسیدند. نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) نشان داد که بیش‌ترین محتوای روی گیاه در مرحله پنجه‌زنی گیاه برنج برای رقم هاشمی ۶۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و در خاک سیلتی رس و گیلانه

فسفر در بافت‌های گیاه برنج در شرایط مختلف آب و هوایی حاکی از جذب آرام و تدریجی فسفر قابل جذب خاک از ابتدای نشای گیاهچه برنج بود، ولی در بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ روز پس از نشای گیاهچه به حداکثر خود رسید. بنابراین، ضروری است که در این بازه زمانی به منظور جلوگیری از تأثیر منفی کمبود فسفر قابل جذب، فسفر در بخش محلول و قابل تبادل (فسفر لبایل) در خاک به اندازه کافی وجود داشته باشد (۴۱). با توجه به اینکه بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ روز پس از نشای گیاه منطبق بر تقسیط دو یا سه مرحله‌ای کود فسفره می‌باشد، این روش می‌تواند به افزایش و حفظ سطح فسفر قابل جذب مورد نیاز گیاه در خاک کمک شایانی کرده و در نهایت به افزایش فسفر درون بافت گیاه به عنوان منبع اصلی تامین فسفر بخش زایشی گیاه انجامد. مطالعات نشان می‌دهد که برای تأمین کافی هر عنصر ضروری برای رشد مناسب محصولات کشاورزی، گیاهان از دو منبع گوناگون استفاده می‌کنند: منابع بیرونی یعنی جذب از طریق خاک و اندام‌های هوایی و یا منابع داخلی ناشی از متحرک سازی مجدد این عناصر در بافت‌های گیاهی در مراحل مختلف رشد برحسب نیاز گیاه (۵۰). منبع اول با کاربرد راهبردهای به‌زراعی همانند افزایش شکل‌های در دسترس این عناصر در خاک با مصرف منابع قابل جذب آن‌ها شکل می‌گیرد (۵۰، ۵۱). منبع دوم مخازن زیستی قابل استفاده مجدد این عناصر در بافت‌های گیاهی پیش از زمان گلدهی بوده که پویایی آن‌ها به روابط بین غلظت این عناصر در خاک، غلظت کل آن‌ها در گیاه و غلظت‌شان در تک‌تک بافت‌های گیاهان زراعی بستگی دارد (۲۵). از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که تأثیر تقسیط در خاک با رس بیش‌تر (سیلت رس) بسیار بیش‌تر از سیلت لوم می‌باشد که به نظر می‌رسد با افزایش میزان رس (سنگین تر شدن بافت خاک) و در

۵۴/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم در خاک سیلت لوم و به ترتیب در تقسیط سه مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و مصرف ۱۰۰ درصد فسفر به صورت پایه به ثبت رسیدند. این در حالیکه بیش‌ترین محتوای روی در بخش هوایی (کاه) در زمان گلدهی برای رقم هاشمی و گیلانه هر دو در خاک سیلت رس و به ترتیب ۲۶/۳ و ۳۷/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و به ترتیب در تیمارهای تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) و دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسیدند.

کمبود فسفر رشد و نمو دانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۱)، چرا که فسفر به صورت ترکیبات آلی فیتات در گیاه ذخیره می‌شود و به همراه سایر عناصر در تشکیل ساختمان دانه گرده دخالت دارد و یکی از مهم‌ترین عناصر در تولید محصول و در شکل‌گیری گل و دانه‌بندی محسوب می‌شود (۲). الگوی تغییرات محتوای فسفر در بافت گیاه برنج متغیر بود و به نوع واریته، سطح فسفر خاک و شرایط محیطی که میزان رشد گیاه برنج را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بستگی داشت. بر این اساس، در مرحله پنجه‌زنی (رشد رویشی) مقدار فسفر اندام‌های هوایی نسبت به شروع مرحله زایشی (گلدهی) کاهش یافته و فسفر موجود در آن‌ها به بافت‌های زایشی منتقل می‌شود و این کاهش در تمام مراحل رشد زایشی ادامه می‌یابد، چرا که باوجود ادامه جذب فسفر از خاک توسط ریشه، این اندام‌های هوایی (ساقه و برگ) است که تامین‌کننده بیش‌تر فسفر مورد نیاز است (۴۱). چراکه فسفر در مقایسه با سایر عناصر مورد نیاز گیاه از تحرک کم‌تری برخوردار بوده و به‌شدت توسط کلسیم، آهن و آلومینیم موجود در رس خاک تثبیت می‌شود (۴۶). همچنین، بررسی الگوی جذب تجمعی

نتیجه افزایش گنجایش بافری، خاک فسفر بیش تری را در خود تثبیت کرده و مقدار فسفر قابل جذب کم تری در اختیار گیاه برای رشد قرار می دهد (۶۳). محمودسلطانی و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی شکل های گوناگون فسفر در اراضی شالیزار بر تأثیر بافت بر میزان فسفر قابل جذب تأکید داشته و بیان کردند که با افزایش میزان رس خاک از مقدار فسفر قابل جذب بطور معنی داری کاسته می شود (۳۸).

محتوای فسفر و روی در دانه: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمارهای کاربردی به استثنای اثر متقابل رقم در بافت بر محتوای روی دانه در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی دار بود. این در حالی است که محتوای فسفر دانه از همه تیمارهای کاربردی و اثرات متقابل تیمارها در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) تأثیر معنی دار می پذیرد. نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین ها (جدول ۳) و داده های اولیه نشان داد که بیشترین محتوای فسفر دانه گیاه برنج برای ارقام هاشمی ۰/۲۵ میلی گرم در کیلوگرم و گیلانه ۰/۲۰ میلی گرم در کیلوگرم هر دو در خاک سیلت لوم و تقسیط های دو مرحله ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد شصت روز بعد از نشاکاری) به دست آمده است. این در حالی است که بیشترین محتوای روی دانه گیاه برنج برای ارقام هاشمی ۲۴/۶ میلی گرم در کیلوگرم و گیلانه ۲۱/۲۰ میلی گرم در کیلوگرم (جدول ۴) هر دو در خاک سیلت لوم و به ترتیب در تقسیط سه مرحله ای (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و تقسیط دو مرحله ای (۵۰ درصد پایه و ۲۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) به ثبت رسید. همچنین، از آنجایی که براساس الگوی جذب تجمعی فسفر در بافت های گیاه برنج در شرایط مختلف آب و هوایی جذب آرام و تدریجی فسفر قابل جذب خاک از

ابتدای نشای گیاهچه برنج شروع و در بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ روز پس از نشای گیاهچه (شروع مرحله رویشی) به حداکثر خود می رسد (۴۱)، تیمار دو مرحله ای (۵۰ درصد پایه، ۵۰ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) دارای بیشترین تأثیر بر افزایش محتوای فسفر دانه را دارا بود. با توجه به اینکه بازه زمانی ۵۰ تا ۷۵ روز پس از نشای گیاه منطبق بر تقسیط دو یا سه مرحله ای کود فسفره می باشد، این روش می تواند به افزایش محتوای فسفر دانه گیاه بیانجامد. همچنین، با توجه به اینکه محتوای فسفر و روی دانه و محتوای روی و فسفر بخش هوایی (کاه) از تیمارهای مشابهی تأثیر می پذیرند به نظر می رسد منابع بیرونی یعنی جذب از طریق خاک و اندام های هوایی و یا منابع داخلی ناشی از متحرک سازی مجدد این عناصر در بافت های گیاهی در مراحل مختلف رشد برحسب نیاز گیاه (۵۰) در مورد هر دو صفت یکسان عمل می کند. یزدانی مطلق (۲۰۱۳)، توین و همکاران (۲۰۰۶) و اسلام و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که کاربرد کود فسفر در زمان و میزان مناسب به افزایش محتوای فسفر دانه می انجامد. نکته حائز اهمیت این است که میزان روی دانه در برخی از تیمارهای تقسیط فسفر در مقایسه با کاربرد فسفر به صورت ۱۰۰ درصد پایه با اختلاف معنی داری بیش تر است (۶۰، ۵۷، ۲۰).

رگرسیون و همبستگی خطی بین غلظت روی و فسفر در خاک، بخش هوایی (کاه) و دانه گیاه در مراحل مختلف رشد برنج: اثر متقابل مقادیر عناصر روی و فسفر در اندام های گوناگون گیاه برنج در مراحل گوناگون رشد با غلظت روی و مقدار پروتیین برنج سفید با استفاده از مدل رگرسیونی چندمتغیره خطی گام به گام نشان داد که متغیرهای غلظت فسفر قابل جذب خاک در مرحله رسیدن دانه، غلظت روی دانه و غلظت روی در بخش هوایی گیاه در مرحله

گلهی رابطه معنی داری با عملکرد دانه برنج داشتند. این سه متغیر بر پایه ضریب تبیین تعدیل شده ۵۲ درصد از تغییرات مقدار عملکرد دانه را تشریح می نمایند (جدول ۵). در میان این متغیرها غلظت فسفر قابل جذب خاک در مرحله رسیدن دانه بیشترین سهم را در تغییرات مقدار عملکرد برنج در این مدل داشت و به نظر می رسد این متغیر مناسب ترین و در دسترس ترین منبع تامین فسفر برای افزایش عملکرد دانه براساس شرایط این آزمایش باشد (رابطه ۱) (جدول ۵). همچنین، مدل رگرسیونی چند متغیره خطی گام به گام برآزش داده شده بین مقدار عملکرد کاه و مقادیر فسفر و روی در خاک و بافت های هوایی گیاه برنج در مراحل گوناگون رشد حاکی از این است که تنها متغیر غلظت فسفر قابل جذب خاک در مرحله رسیدن رابطه معنی داری با این صفت داشت و به نظر می رسد این متغیر بر پایه ضریب تبیین تعدیل شده ۳۱/۱ درصد از تغییرات آن را تشریح می نمایند (رابطه ۲) (جدول ۵). نکته مهم در نتایج این مطالعه نزدیکی عددی ضریب همبستگی بین فسفر قابل جذب خاک در مراحل مختلف و محتوای فسفر بخش هوایی (کاه) در مرحله گلهی می باشد. این نزدیکی نشان دهنده هم ترازوی منبع داخلی تامین فسفر برای رشد رویشی (فسفر موجود در بخش هوایی) و فسفر قابل جذب خاک در این مرحله است. پفیفیر و مک کلافرتی (۲۰۰۷) نشان دادند که عناصر جذب شده توسط گیاه برنج در مراحل پیش از رسیدن دانه در اندام های گوناگون گیاه برنج ذخیره و در مرحله رسیدن دانه به دلیل رهاسازی دوباره این عنصر توسط برگ و ساقه به نقاط مورد نیاز مانند خوشه در مرحله گلهی و خوشه و دانه در زمان پرشدن دانه به همراه عنصر جذب شده از خاک به بخش زایشی منتقل شود (۵۱). علاوه بر این ها، ضریب منفی

مقادیر فسفر قابل جذب خاک و محتوای روی بخش هوایی در مرحله گلهی حاکی از این نکته است فسفر می تواند تأثیر منفی در جذب، نگهداری و انتقال روی در بافت های هدف در گیاه برنج داشته باشد که احتمالاً می تواند به یکی از دلایلی که در ادامه اشاره می شود باشد. اولین مورد به رشد قابل توجه گیاه هم زمان با مصرف کودهای فسفر باز می گردد که باعث کاهش غلظت روی به ازای وزن بوته شده و به "اثر رقت" شهرت دارد. فرضیه دوم درباره تأثیر کمبود روی بر افزایش نفوذ پذیری غشای سلول ریشه به علت تخریب ریشه و یا عدم کارکرد صحیح فعالیت های بارگیری آوند چوبی و در نتیجه کاهش معنی دار انتقال روی از ریشه به ساقه مرتبط است. دیدگاه سوم به کاهش توسعه ریشه و فعالیت های قارچ های میکوریزا در اثر مصرف زیاد فسفر می باشد که در اثر آن سطح جذب روی در خاک کاهش یافته و گیاه دچار کمبود می شود (۱۷). تأثیر منفی فسفر بر مقدار روی قابل جذب خاک و محتوای روی گیاه با یافته های محمود سلطانی و همکاران (۲۰۱۶) در یک راستا است (۳۹).

رابطه ۱:

$$GW=31.17+0.247 PS3-0.52 ZG-0.21 ZA2$$

رابطه ۲:

$$SW=134.94+1.15 PS3$$

ضریب های همبستگی خطی بین غلظت روی و فسفر قابل جذب خاک، محتوای روی و فسفر بخش هوایی (کاه) و دانه گیاه در مراحل مختلف رشد برنج در جدول ۶ نشان داده شد. بیشترین ضریب همبستگی خطی بین غلظت فسفر قابل جذب خاک در مرحله گلهی و رسیدن دانه با غلظت فسفر قابل جذب خاک در مرحله پنجه زنی به ترتیب 0.55^{**} و 0.48^{**} بود.

جدول ۵ - معادله رگرسیون بین صفات.

Table 5- The regression equation of selected characters.

صفت اصلی Main Factor	معادله Equation Components	ضرایب Coefficients	انحراف معیار Standard Error	ضریب تبیین تصحیح شده Adjust R	معنی داری Significance
عملکرد دانه Grain Weight	ضریب ثابت معادله (Constant)	31.17	4.96	0.52	0.000**
	مقدار فسفر خاک در مرحله برداشت گیاه برنج (PS3)	0.25	0.07		0.001**
	مقدار روی در دانه (ZG)	-0.52	0.21		0.015*
عملکرد کاه Straw Weight	مقدار روی در اندام هوایی در مرحله گلدهی (ZA2)	-0.21	0.1	0.32	0.04*
	ضریب ثابت معادله (Constant)	134.94	13.17		0.000**
	مقدار فسفر خاک در مرحله برداشت گیاه برنج (PS3)	1.15	0.46		0.015*

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می باشند.

*, ** and ns are significant at 5 and 1% confidence levels and non significant, respectively.

جدول ۶- ضرایب همبستگی خطی بین غلظت روی و فسفر در خاک، بخش هوایی (کاه) و دانه گیاه برنج در مراحل مختلف رشد برنج.

Table 6- The linear correlation coefficients between the soil P and Zn concentration, and P and Zn content of rice arial tissues and grain at different rice growth stges.

	PS1	PS2	PS3	PA1	PA2	PG	ZS1	ZS2	ZS3	ZA1	ZA2	ZG	GW	SW
PS1	1													
PS2	0.55**	1												
PS3	0.48**	0.59**	1											
PA1	0.15 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.09 ^{ns}	1										
PA2	0.09 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.27**	0.19 ^{ns}	1									
PG	-0.04 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.17 ^{ns}	1								
ZS1	0.07 ^{ns}	0.05 ^{ns}	-0.03 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.19 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	1							
ZS2	0.42**	0.24 ^{ns}	0.10 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.27**	1						
ZS3	-0.06 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	0.25 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	1					
ZA1	-0.08 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	0.22 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.30*	-0.16 ^{ns}	0.02 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.26*	1				
ZA2	-0.15 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	0.10 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	-0.38**	-0.24 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.19 ^{ns}	1			
ZG	0.2 ^{ns}	0.18 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.44**	0.08 ^{ns}	0.10 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	1		
GW	0.14 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.41**	0.25 ^{ns}	0.28*	0.04 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	-0.26*	1	
SW	0.07 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.31**	0.05 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.88**	1

PS1, PS2, PS3, PA1, PA2, PG, ZS1, ZS2, ZS3, ZA1, ZA2, ZG, GW and SW are soil available phosphorus at maximum tillering stage of rice plant, soil available phosphorus at flowering stage of rice plant, soil available phosphorus at ripening stage of rice plant, phosphorous content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, phosphorous content of aerial part at flowering stage of rice plant, phosphorous content of rice grain, soil available zinc at maximum tillering stage of rice plant, soil available zinc at flowering stage of rice plant, soil available zinc at ripening stage of rice plant, zinc content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, zinc content of aerial part at flowering stage of rice plant, zinc content of rice grain, grain weight and straw weight, respectively.

مرحله پنجه زنی گیاه برنج، فسفر قابل استفاده خاک در مرحله گل دهی گیاه برنج، فسفر قابل استفاده خاک در مرحله رسیدگی گیاه برنج، فسفر اندام هوایی در مرحله پنجه زنی گیاه برنج، فسفر اندام هوایی در مرحله گل دهی گیاه برنج، محتوای فسفر دانه برنج، روی قابل استفاده خاک در مرحله پنجه زنی گیاه برنج، روی قابل استفاده خاک در مرحله گل دهی گیاه برنج، روی قابل استفاده خاک در مرحله رسیدگی گیاه برنج، روی اندام هوایی در مرحله پنجه زنی گیاه برنج، روی اندام هوایی در مرحله گل دهی گیاه برنج، محتوای روی دانه برنج، وزن دانه و وزن کاه و کلس.

*: معنی دار در سطح احتمال پنج درصد، **: معنی دار در سطح احتمال یک درصد و ns: غیر معنی دار

PS1, PS2, PS3, PA1, PA2, PG, ZS1, ZS2, ZS3, ZA1, ZA2, ZG, GW and SW are soil available phosphorus at maximum tillering stage of rice plant, soil available phosphorus at flowering stage of rice plant, soil available phosphorus at ripening stage of rice plant, phosphorous content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, phosphorous content of aerial part at flowering stage of rice plant, phosphorous content of rice grain, soil available zinc at maximum tillering stage of rice plant, soil available zinc at flowering stage of rice plant, soil available zinc at ripening stage of rice plant, zinc content of aerial part at maximum tillering stage of rice plant, zinc content of aerial part at flowering stage of rice plant, zinc content of rice grain, grain weight and straw weight, respectively.

*, ** and ns are significant at 5 and 1% confidence levels and non significant, respectively.

مرحله رسیدن دانه ($0/31^*$) بیشترین ضریب همبستگی خطی را داشت.

کارایی های مصرف فسفر: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۷) نشان داد که اثر رقم، بافت خاک و تیمارهای تقسیط فسفر و اثر متقابل همه آنها بر تمام مدل های کارایی های فسفر از جمله کارایی زراعی، فیزیولوژیک، مصرف فسفر، بازیافت ظاهری و همچنین، کارایی فیزیولوژیک - زراعی در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی دار بود. تنها استثنای موجود مربوط به اثر متقابل رقم در خاک است که تأثیر معنی داری بر کارایی فیزیولوژیک ندارد.

بیشترین ضریب همبستگی خطی بین غلظت روی و فسفر بخش هوایی (کاه) در مرحله گلدهی و فسفر قابل جذب خاک در مرحله پنجه زنی به ترتیب $0/43^{**}$ و $0/27^{**}$ بود. بیشترین ضریب همبستگی خطی بین غلظت روی قابل جذب خاک و روی بخش هوایی در مرحله گلدهی با غلظت روی قابل جذب خاک در مرحله پنجه زنی به ترتیب $0/27^*$ و $0/38^{**}$ - به دست آمد. بیشترین ضریب همبستگی خطی بین عملکرد دانه با غلظت فسفر در خاک در مرحله رسیدن دانه ($0/41^{**}$) و غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه در مرحله گلدهی ($0/28^*$) بود. همچنین، عملکرد کاه با غلظت فسفر در خاک در

جدول ۷- تجزیه واریانس کارایی های مصرف فسفر در دو رقم برنج (هاشمی و گیلانه) در تیمارهای کود فسفر.

Table 8- The analysis of variance of different P recovery indexes on two rice varieties (Hashemi and Guilaneh) under P splitting treatments.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی dF	Mean Squares میانگین مربعات				
		کارایی فیزیولوژیک - زراعی Physiological - Agricultural Efficiency	کارایی مصرف Use Efficiency	کارایی بازیافت ظاهری Apparent Recovery	کارایی فیزیولوژیک فسفر Physiological Efficiency	کارایی زراعی فسفر Agricultural Recovery
تکرار Replication	2	558.34**	12568.74 ^{ns}	0.001 ^{ns}	169.46 ^{ns}	0.18 ^{ns}
رقم Variety	1	97256.88**	405191.78**	21.97**	104854.46**	17.78**
بافت خاک Soil type	1	256156.32**	81390.22**	1.88**	778861.94**	36.83**
فسفر Phosphorus	4	193349.74**	2684798.89**	43.62**	384612.54**	228.51**
رقم × بافت خاک Soil texture × Variety	1	98718.17**	539728.75**	32.21**	164.47**	19.05**
رقم × فسفر Variety × Phosphorous	4	57672.48**	116114.79**	4.06**	57644.42**	6.003**
خاک × تیمار Soil texture × Phosphorous	4	51209.16**	156147.75**	5.05**	94678.01**	9.02**
رقم × خاک × فسفر Variety × Soil texture × Phosphorous	4	82746.97**	240594.04**	6.66**	81378.35**	11.44**
خطا Error	38	85.24	4241.84	0.01	348.08	0.05
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		4.09	8.36	2.99	7.74	3.06

* و ** و ns به ترتیب معنی داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد و عدم معنی داری می باشند.

*, ** and ns are significant at 5 and 1% confidence levels and non significant, respectively.

نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول ۸ نشان داد که بیشترین مقدار کارایی فیزیولوژیک-زراعی برای رقم هاشمی (۴۸۲ کیلوگرم در کیلوگرم) و گیلانه (۷۵۳ کیلوگرم در کیلوگرم) هر دو در بافت سیلت رس و به ترتیب تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصدی فسفر به صورت پایه و شاهد (عدم مصرف کود) به دست آمد. بیشترین مقدار کارایی مصرف برای رقم هاشمی (۱۹۹۸ کیلوگرم در کیلوگرم) و گیلانه (۱۲۷۲/۲ کیلوگرم در کیلوگرم) هر دو در بافت سیلت رس و به ترتیب تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصدی فسفر به صورت پایه و شاهد (عدم مصرف کود) به دست آمد. همچنین، بیشترین بازیافت ظاهری برای رقم هاشمی (۷/۳۲ کیلوگرم در کیلوگرم) و گیلانه (۵/۶۷ کیلوگرم در کیلوگرم) هر دو در بافت سیلت لوم و به ترتیب در تقسیم سه مرحله ای فسفر (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد فسفر روز بعد از نشاکاری) و مصرف ۱۰۰ درصدی فسفر به صورت پایه به دست آمد. با روندی مشابه با کارایی زراعی بیشترین مقدار کارایی فیزیولوژیک برای رقم هاشمی (۶۹۳/۲ کیلوگرم در کیلوگرم) و گیلانه (۷۴۰/۱ کیلوگرم در کیلوگرم) هر دو در بافت سیلت رس و به ترتیب در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصدی فسفر به صورت پایه و شاهد (عدم مصرف کود) به دست آمد. بیشترین مقدار کارایی زراعی برای رقم هاشمی (۱۳/۳۱ کیلوگرم در کیلوگرم) و گیلانه (۱۲/۷۲ کیلوگرم در کیلوگرم) هر دو در بافت سیلت رس و به ترتیب در تیمار کودی مصرف ۱۰۰ درصدی فسفر به صورت پایه و شاهد (عدم مصرف کود) به دست آمد.

علاوه بر تأثیر نوع ژنتیک گیاهی در توانایی میزان جذب و مصرف و در نهایت میزان کارایی فسفر در گیاه عوامل محیطی نیز مؤثر شناخته شده است (۱۳).

یکی از عوامل محیطی مؤثر در میزان کارایی فسفر می‌تواند مرتبط با میزان و نحوه کوددهی فسفر باشد که بر میزان رشد ریشه و تشکیل تارهای کشنده برای جذب فسفر تأثیرگذار شناخته شده است که در آزمایش حاضر نیز با تقسیم کود فسفر تأثیر نحوه و میزان در اختیار قرار دادن این کود بر کارایی فسفر در گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که تقریباً در تمام موارد تقسیم فسفر با در اختیار قرار دادن به هنگام فسفر قابل تبادل کارایی بهتری نسبت به مصرف ۱۰۰ درصدی کود فسفر به صورت پایه داشتند. علاوه بر آن، عملکرد اندام‌های هوایی گیاه نیز شاخصی برای میزان کارایی فسفر در گیاه شناخته شده است و مولفه‌های کل غلظت فسفر در گیاه و عملکرد اندام‌های هوایی در حالت ناکافی بودن فسفر می‌توانند شاخص‌های قابل اطمینانی برای ارزیابی میزان کارایی فسفر در گیاه باشند (۴۹). با بررسی ۱۸ رقم غلات در استرالیا مشخص شد که کل فسفر جذب شده توسط گیاه با عملکرد اندام‌های هوایی همبستگی مثبتی دارد و کارایی فسفر بیش‌تر در نهایت منجر به عملکرد بالاتر خواهد شد (۳۱). در این آزمایش نیز با مقایسه برترین تیمارها در کارایی فسفر و عملکرد دانه مشاهده شد بین عملکرد و کارایی فسفر ارتباط مثبتی وجود دارد و بالاترین عملکرد (۳۲/۳ گرم در بوته) در تقسیم سه مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) مشابه با بالاترین کارایی مصرف فسفر (۱۲۷۲ کیلوگرم در کیلوگرم) مشاهده و ثبت شد. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که در بسیاری از اراضی کشاورزی با بیش بود و یا کمبود مصرف روبه‌رو هستیم و مصرف متعادل و براساس نیاز گیاه کم‌تر رخ می‌دهد (۳۵). البته همواره بیش از ۵۰ درصد از فسفر مصرفی به دلیل مصرف در زمان و مکان نامناسب و یا به دلیل تثبیت سبب کاهش

شهرام محمود سلطانی و همکاران

از حد) راه کارهای افزایش کارایی با یکدیگر تفاوت داشته و به توانایی جذب گیاه، انتقال داخلی این عنصر و میزان قابلیت دسترسی آن در خاک بستگی دارد (۵۴).

تولید ناشی از کمبود فسفر می شود (۱۹، ۳۴). دوبرمن و فیرهورست (۲۰۰۰) نشان دادند که کارایی مصرفی فسفر در اراضی شالیزاری ۲۵ درصد فسفر مصرفی است (۱۱). بنابراین، برخی معتقدند که برای شرایط متفاوت مصرف فسفر (مصرف کم و یا مصرف بیش

جدول ۸- مقایسه میانگین های کارایی های مصرف فسفر در دو رقم برنج (هاشمی و گیلانه) در تیمارهای کود فسفر.

Table 8- The mean comparison of different P recovery indexes on two rice varieties (Hashemi and Guilaneh) under P splitting treatments.

تیمارهای کاربردی Applied Treatments		صفات اندازه گیری شده Measured Characters					
ارقام برنج Rice Varieties	بافت خاک Soil Texture	تقسیم فسفر P splitting	کارایی فیزیولوژیک- کارایی فیزیولوژیک				کارایی زراعی
			کارایی مصرف Use Efficiency	کارایی باز یافت ظاهر Apparent Recovery	کارایی فیزیولوژیک Physiological Recovery	کارایی زراعی Agricultural Recovery	
(kg.kg ⁻¹) کیلوگرم در کیلوگرم							
هاشمی Hashemi	سیلتی لوم Silt Loam	P ₁	241.98f	566.67g	2.34i	241.98f	6.74h
		P ₂	217.20g	962.22cd	4.43f	213.04fg	9.62e
		P ₃	175.68jk	938.89cd	5.34c	164.28h	9.39e
		P ₄	168.75k	778.89def	4.61e	182.95gh	7.79f
		P ₅	147.41l	1055.56c	7.16a	336.85e	10.56cd
	سیلتی رس Silty Clay	P ₁	237.47f	1268.89b	5.34c	465.36d	12.69b
		P ₂	482.00b	1988.00a	4.11g	693.19b	13.31a
		P ₃	184.51ij	1045.56c	5.67b	462.75d	10.46cd
		P ₄	275.24e	732.22efg	2.66h	470.96d	7.32g
		P ₅	199.07hi	927.78cde	4.66e	315.83e	9.28e
گیلانه Guilaneh	سیلتی لوم Silt Loam	P ₁	211.26gh	1062.22c	5.03d	330.35e	10.62c
		P ₂	115.03m	651.11fg	5.66b	119.71i	6.51h
		P ₃	418.92d	567.78g	1.36k	590.25c	5.67i
		P ₄	446.94c	730.00efg	1.63jk	714.29ab	7.30g
		P ₅	240.43e	1017.78c	4.23fg	314.97e	10.23d
	سیلتی رس Silty Clay	P ₁	753.00a	1272.22b	1.69j	740.13a	12.72b
		P ₂	241.98f	566.67g	2.34i	241.98f	6.74h
		P ₃	27.20g	962.22cd	4.43f	213.04fg	9.62e
		P ₄	175.68jk	938.89cd	5.34c	164.28h	9.39e
		P ₅	168.75k	778.89def	4.61e	182.95gh	7.7f

میانگین هایی که در هر ستون، دارای حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون LSD، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی داری ندارند.

Means in each column, followed by similar letters are not significantly different at the 5% probability level- LSD Test.

این روش ها بر کارایی فسفر و همچنین، محتوای فسفر و روی خاک و اندام هوایی و دانه برنج خصوصاً برای ارقام محلی هاشمی و اصلاح شده گیلانه می تواند نقش به سزایی در بهبود باز یافت فسفر داشته باشد. نتایج نشان داده است که تقسیم با افزایش فراهمی فسفر قابل جذب طی فصل رشد به ویژه ۲۰ و

نتیجه گیری کلی

باز یافت کم فسفر در خاک های اراضی شالیزاری (کمتر از ۲۵ درصد فسفر افزوده شده) دسترسی گیاه به این عنصر مهم را در طی فصل رشد تحت تأثیر خود قرار داده و یافتن راه حل های کاربردی مناسب (زمان مناسب کاربرد و امکان تقسیم) و تأثیر

هاشمی و در خاک لوم سیلت در تقسیط سه مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه، ۲۵ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری و ۲۵ درصد ۶۰ روز بعد از نشاکاری) و افزایش ۳۷/۵ درصدی در رقم گیلانیه و در خاک رس سیلت در تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه، ۵۰ درصد ۲۰ روز بعد از نشاکاری) نسبت به مصرف پایه (۱۰۰ درصد) کود فسفر نشان‌دهنده تأثیر مثبت و موثر تقسیط نسبت به شرایط عدم تقسیط در بهبود کیفیت دانه بود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با تکرار این آزمایش در شرایط مزرعه علاوه بر بررسی شرایط واقعی مزرعه بر تقسیط برنج از نظر اقتصادی نیز امکان تقسیط بررسی گردد.

۶۰ روز پس از نشاکاری با انطباق بر زمان حداکثر نیاز گیاه به این عنصر تأثیر معنی‌داری بر تقریباً تمام صفات از جمله محتوای فسفر و روی دانه، محتوای فسفر و روی خاک و اندام هوایی و همچنین، کارایی‌های زراعی، فیزیولوژیک، بازیافت ظاهری و مصرف داشت. افزایش مقادیر فسفر در بخش هوایی و دانه، و کارایی‌های مورد بررسی خصوصاً طی تقسیط دو مرحله‌ای (۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد شصت روز بعد از نشاکاری) نسبت به مصرف پایه (۱۰۰ درصد) کود فسفره نشان‌دهنده تأثیر مثبت تقسیط بر افزایش بازیافت فسفر طی این آزمایش بود. همچنین، افزایش ۵۴/۷۲ درصدی روی دانه در رقم

References

1. Alloway, B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Env. Geochem. Hlth.* 31: 5537-548.
2. Amanullah, I., and Inamullah, X. 2016. Dry matter partitioning and harvest index differ in rice genotypes with variable rates of phosphorus and zinc nutrition. *Rice Sci.* 23: 2. 78-87.
3. Archana, K., Prabhakar Reddy, T., Anjaiah, T., and Padmaja, B. 2016. Effect of dose and time of application of phosphorous on yield and economics of rice grown on P accumulated soil. *Int. J. Env. Sci. Technol.* 5: 5. 3309-3319.
4. Babu, P.S., Reddy, P.V., and Sathe, A. 2005. Phosphorus requirement and use efficiency by sunflower, *Helianthus annuus L.* in P-accumulated vertisols. *J. Oilseeds Res.* 22: 2. 410-423.
5. Bubba, M.O., Arias, C.A., and Porix, H. 2003. Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow cultivated reed beds as measured by the Langmuir adsorption isotherms. *Water Res.* 37: 3390-3400.
6. Campbell, C.R., and Plank, C.O. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. *Methods for Plant Analysis*, 37 p.
7. Cavell, A.J. 1955. The colorimetric determination of phosphorus in plant materials. *J. Sci. Food Agric.* 6: 8. 479-480.
8. Chang, H.B., Lin, C.W., and Huang, H.J. 2005. Zinc-induced cell death in rice (*Oryza sativa L.*) roots. *Plant growth regul.* 46: 3. 261-266.
9. Dobermann, A., and Fairhurst, T.H. 2000. Nutrient disorders and nutrient management. Potash and Phosphate Institute of Canada and International Rice Research Institute: Singapore.
10. FAO. 2018. Rice market monitor. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations: Rome.
11. Gahoonia, T.S., and Nielsen, N.E. 1996. Variation in acquisition of soil phosphorus among wheat and barley genotypes. *Plant Soil.* 178: 2. 223-230.
12. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis 1. Methods of soil analysis: Part 1- Physical and mineralogical methods, (methods of soilan 1), Pp: 383-411.
13. Grotz, N., and Guerinot, M. L. 2002. Limiting nutrients: an old problem with new solutions? *Curr. Opin. Plant Biol.* 5: 2. 158-163.
14. Güngör, E., and Bekbölet, M. 2010. Zinc release by humic and fulvic acid as

- influenced by pH, complexation and DOC sorption. *Geoderma*. 159 (1): 131-138.
15. Hafeez, B., Khanif, Y.M., and Saleem, M. 2013. Role of zinc in plant nutrition- a review. *J. Exp. Agric. Int.* 21: 374-391.
 16. He, Y., Shen, Q., Kong, H., Xiong, Y., and Wang, X. 2005. Effect of soil moisture content and phosphorus application on phosphorus nutrition of rice cultivated in different water regime systems. *J. plant nutr.* 27 : 12. 259-2272.
 17. Heuer, S., Gaxiola, R., Schilling, R., Herrera-Estrella, L., López-Arredondo, D., Wissuwa, M., Delhaize, E., and Rouached, H. 2017. Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. *Plant J.* 90 : 5. 868-885.
 18. Hirschi, K. 2008. Nutritional improvements in plants: time to bite on biofortified foods. *Trends Plant Sci.* 13: 459-463.
 19. Huck, C.Y., Ahmed, O.H., and Majid, N.M.A. 2016. Minimizing phosphorus sorption and leaching in a tropical acid soil using Egypt rock phosphate with organic amendments. *Philippine Agric Sci.* 99: 176-185.
 20. Hussain, S., Maqsood, M.A., Rengel, Z. and Aziz, T. 2012. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application. *Plant Soil.* 361: 1-2. 279-290.
 21. Irannejad, H., and Shahbazian, N. 2002. *Cereals agronomy*. Second edition, Karand Press. (In Persian).
 22. Islam, M.A., Islamand, M.-R., and Sarker, A.B.S. 2008. Effect of phosphorus on nutrient uptake of japonica and indica rice. *J. Agric. Ext. Rural Dev.* 6: 1-2. 7-12.
 23. Jiang, W., Struik, P.C., Lingna, Van Keulen, J.H., Ming, Z., and Stomph, T.J. 2007. Uptake and distribution of root-applied or foliar-applied ⁶⁵Zn after flowering in aerobic rice. *Ann. Appl. Biol.* 150: 3. 383-391.
 24. Kamkar, B., Safahani Langroodi, A., and Mohamadi, R. 2001. Application of minerals in crops nutrition. *Jehad Daneshgahi Press*. Mashhad. Iran. 500 p.
 25. Khan, R., Gurmani, A.R., Khan, M.S., and Gurmani, A.H. 2007. Effect of zinc application on rice yield under wheat rice system. *Pakistan J. Bio. Sci.* 10 : 2. 235-239.
 26. Khoshgoftarmanesh, A.H., Sadrarhami, A., Sharifi, H.R., Afiuni, D., and Schulin, R. 2009. Selecting zinc-efficient wheat genotypes with high grain yield using a stress tolerance index. *Agron. J.* 101 : 6. 1409-1416.
 27. Kumar, A.D.V.S.L.P., Rao, M.S., and Satyanarayana, M. 2015. Influence of soil test based application of phosphorous fertilizers on yield of paddy: A case study in khammam District of Andhra Pradesh. *J. Rice Res.* 8: 1. 48-50.
 28. Kumhar, A.K. 2009. Studies on phosphorus use efficiency in rice (*Oryza sativa*) using ³²P tagged SSP. *J. Nucl. Agric. Biol.* 38: 1-4. 41-50.
 29. Lombi, E., Smith, E., Hansen, T.H., Paterson, D., De Jonge, M.D., Howard, D.L., Persson, D.P., Husted, S., Ryan, C., and Schjoerring, J.K. 2011. Megapixel imaging of (micro) nutrients in mature barley grains. *J. Exp. Bot.* 62: 1. 273-282.
 30. Lynch, J.P. 2011. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. *Plant physio.* 156: 3. 1041-1049.
 31. MacDonald, G.K., Bennett, E.M., Potter, P.A., and Ramankutty, N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 108: 7. 3086-3091.
 32. Mahmoudsoltani, S., Mohamed, M.H., Samsuri, A., and Sharifah, S.M.K. 2017. Lime and Zn application effects on soil and plant Zn status at different growth stages of rice in tropical acid sulphate paddy soil. *Az. J. Agri.* 4: 4. 127-138.
 33. Mahmoudsoltani, S., Allagholipoor, M., Shakoori, M., and Paykan, M. 2019. Behavior of available phosphorus during submerged condition in rice paddy soils by adding phosphorus fertilizer. *J. Water Soil Conser.* 24: 6. 25-46.

34. Mahmoudsoltani, S., Davatgar, N., Kavooosi, M., and Darighoftar, F. 2011. Phosphorous fractionation of paddy fields and their relations with physical and chemical properties of soils (Case study: Some-e-Sara city, Guilan province. *J. Water Soil Conser.* 18: 2. 159-176.
35. Mahmoudsoltani, S. 2020. Zn biofortification, grain protein content, and zinc and phosphorus content of rice tissues at different growth stages affected by zinc and phosphorus foliar application. *Iran J Soil Water Res.* (Accepted).
36. Malakooti, M.J., and Kavooosi, M. 2004. Balance nutrition of rice. SANA publication press. (In Persian).
37. Mayer, J.E., Pfeiffer, W.H., and Beyer, P. 2008. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11: 1-5.
38. Meena, R.K., Neupane, M.P., and Singh, S.P. 2014. Effect of phosphorous levels and bioorganic sources on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Int. J. Agri. Sci. Res.* 11: 286-289.
39. Nawaz, H., Zubair, M., and Derawadan, H. 2012. Interactive effects of nitrogen, phosphorus and zinc on growth and yield of Tomato (*Solanum lycopersicum*). *Afr. J. Agric. Res.* 7: 26. 3792-3769.
40. Nishigaki, T., Tsujimoto, Y., Rinasoa, S., Rakotoson, T., Andriamananjara, A., and Razafimbelo, T. 2019. Phosphorus uptake of rice plants is affected by phosphorus forms and physicochemical properties of tropical weathered soils. *Plant soil.* 435: 1-2. 27-38.
41. Ozturk, L., Eker, S., Torun, B., and Cakmak, I. 2005. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. *Plant soil.* 269: 1-2. 69-80.
42. Palmgren, M.G., Clemens, S., Williams, L.E., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J.K., and Sanders, D. 2008. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends plant sci.* 13: 9. 464-473.
43. Pfeiffer, W.H., and McClafferty, B. 2007. Harvest plus: breeding crops for better nutrition. *Crop Sci.* 47: 3. 88-105.
44. Regmi, B., Rengel, Z., and Shaberi-Khabaz, H. 2010. Fractionation and distribution of zinc in soils of biologically and conventionally managed farming systems. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Western Australia, Pp: 105-108.
45. Roades, J.D. 1982. Soluble salts. P. 167-179. In A.L. Page et.al. (eds). *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
46. Rose, T.J., and Wissuwa, M. 2012. Rethinking internal phosphorus utilization efficiency: a new approach is needed to improve PUE in grain crops. *Advan. Agron.* 116: 185-217.
47. Singh, A.L., Singh, P.K., and Latha, P. 1988. Effect of split application of phosphorous on the growth of azolla and low land rice. *Fertil. Res.* 16: 20. 109-117.
48. Tonini, A., and Cabrera, E. 2011. Opportunities for global rice research in a changing world (No. 2215-2019-1630).
49. Tuyen, T.Q., Van Phung, C., and Tinh, T.K. 2006. Influence of long term application of N, P, K Fertilizer on major soil elements. *Omonrice.* 14: 92-96.
50. Yadav, S.L., Ramteke, J.R., Gedam, V.B., and Powar, M.S. 2004. Effect of time of application of phosphorus and potassium on the yield and nutrients uptake of rice hybrids. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 29: 2. 242-243.
51. Yazdani Motlag, N., Reyhanitabar, A., and Najafi, N. 2013. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on their, and as well on potassium uptake by rice plant under flooded vs. non-flooded conditions. *Iranian J. Soil Water Res.* 44: 2. 183-192. (In Persian)
52. Yosef Tabar, S. 2012. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on growth and yield rice (*Oryza sativa* L.). *Int. J. Agron. Plant Prod.* 3: 12. 579-584.

53. Zheng, S., Ren, H., Li, W., and Lan, Z. 2012. Scale-dependent effects of grazing on plant C: N: P stoichiometry and linkages to ecosystem functioning in the Inner Mongolia grassland. PLoS One. 7: 12. p.e51750.

54. Zheng, Z., Parent, L.E. and MacLeod, J.A. 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. Can J. soil sci. 83: 4. 395-403.

