نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۵، ص. ۵۱۰-۴۹۷

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 2, May.-Jun. 2016, p. 497-510

اثرهای روی و فسفر بر غلظت عناصر غذایی، نشاسته و قندهای احیایی غده سیب‌زمینی در شرایط با و بدون تنش کمبود آب

رحیم مطلبی فرد[1*]- نصرت اله نجفی[2]- شاهین اوستان[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۹

چکیده

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر سطوح رطوبت خاک، روی و فسفر بر ترکیب شیمیایی و غلظت عناصر غذایی غده سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم آگریا به‌صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و با سه عامل در شرایط گلخانه‌ای اجرا شد. در این آزمایش سطوح روی شامل مقادیر ۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک، سطوح فسفر شامل مقادیر ۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک و سطوح رطوبت خاک شامل سه سطح (FC–۰/۹FC، FC–۰/۸FC و FC–۰/۷FC) بود. در پایان دوره رشد، عملکرد و اجزای عملکرد غده تعیین و غلظت قندهای احیایی در بافت تازه و غلظت نشاسته، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، سدیم، آهن، منگنز و روی در ماده خشک غده سیب‌زمینی تعیین شد. با کاهش رطوبت خاک غلظت نیتروژن، فسفر و قندهای احیایی غده افزایش ولی غلظت سدیم، منیزیم، آهن و نشاسته آن کاهش یافت ($p<0/05$). با این حال، کاهش رطوبت خاک بر غلظت پتاسیم و روی غده تأثیر معنی‌داری نداشت. مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک باعث افزایش غلظت نشاسته، سدیم، آهن و روی غده شد ($p<0/05$) ولی بر غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیم تأثیر معنی‌داری نداشت. مصرف ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک باعث کاهش غلظت نیتروژن و افزایش غلظت نشاسته، قندهای احیایی و فسفر غده شد ($p<0/05$) ولی بر غلظت پتاسیم، منیزیم، سدیم، آهن و روی غده تأثیر معنی‌داری نداشت.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، رطوبت خاک، کیفیت غده سیب‌زمینی

مقدمه

سیب‌زمینی یکی از محصولات زراعی مهم دنیا می‌باشد که با ۳۲۱ میلیون تن بعد از برنج، گندم و ذرت رتبه چهارم را دارا می‌باشد (۱۲). در ایران این محصول با حدود سه درصد از سطح زیر کشت آبی کشور، ۷/۲ درصد از کل تولیدات زراعی (دیم و آبی) کشور را به‌میزان ۵/۵۷ میلیون تن به خود اختصاص داده است (۳). نیاز آبی سیب‌زمینی بیش از ۸۰۰۰ متر مکعب در هکتار است که با توجه به بحران آب و قرارگیری کشور در کمربند خشک زمین، به‌کارگیری روش‌های مدیریتی مناسب برای کاهش مصرف آب و افزایش کارایی مصرف آب در کشت آن ضروری می‌باشد. برای عملکرد مطلوب سیب‌زمینی وجود رطوبت کافی در خاک مخصوصاً در دوره‌های تشکیل و پر شدن غده‌ها ضروری است (۱۹). سیب‌زمینی به علت سامانه ریشه سطحی و کم پشت به‌عنوان محصول حساس به کمبود آب شناخته شده است و بر اثر تنش کمبود آب عملکرد آن به‌شدت کاهش می‌یابد (۱۸). کمبود آب رشد و توسعه ریشه، برگ و غده سیب‌زمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث تغییرات عمده در ترکیب شیمیایی و غلظت عناصر غذایی آن می‌شود (۱۰ و ۱۳).

کمبود آب می‌تواند جذب و غلظت عناصر غذایی را در گیاهان تحت تأثیر قرار دهد. افزایش یا کاهش غلظت عناصر غذایی به شدت تنش، نوع عنصر، رقم و اندام گیاه بستگی دارد (۶). کمبود آب با کاهش تعرق و انتقال عناصر غذایی از خاک به سطح ریشه (از طریق کاهش انتشار و جریان توده‌ای)، آسیب به انتقال فعال و تراوایی غشای سلولی (۶، ۵۵ و ۵۶)، تغییر ویژگی‌های خاک و فعالیت‌های آنزیمی و تغییر شدت فتوسنتز، تنفس و ظرفیت آن‌ها برای مصرف عناصر میزان جذب و انتقال عناصر غذایی از ریشه به بخش هوایی را کاهش می‌دهد. همچنین میزان عناصر غذایی در گیاه می‌تواند به علت کاهش رشد و اثر تغلیظ[4] و یا تجمع عناصر در اندامی خاص جهت مقابله با

۱- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی همدان
(*- نویسنده مسئول: Email: motalebifard@gmail.com)
۲ و ۳- دانشیاران گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

4- Concentration effect

تنش، افزایش یابد (۴۲). به‌دلایلی که ذکر شد نتایج ضد و نقیضی در مورد تأثیر تنش کمبود آب بر غلظت عناصر غذایی در گیاهان مختلف گزارش شده است. کاهش غلظت عناصر غذایی با اعمال تنش کمبود آب در پژوهش‌های زبیدی و همکاران (۵۸) در رقم‌های مختلف گندم نان و دوروم، ون‌تائو و ویگو (۵۳) در سه گیاه مختلف و رضایی و همکاران (۳۸) بر روی گندم مشاهده شد؛ در حالی‌که افزایش غلظت عناصر غذایی در پژوهش‌های سامارا و مولن (۴۱) در گیاه سویا و زائوهوی و همکاران (۵۷) در گندم در شرایط مشابه مشاهده شد. همچنین مصرف متعادل و کافی عناصر غذایی هم می‌تواند در بهبود اثرهای سوء تنش کمبود آب مؤثر باشد (۵۲). نقش عناصر غذایی مختلف در بهبود اثرهای تنش کمبود آب در گیاهان توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است که می‌توان به نقش فسفر (۷)، پتاسیم (۵۲)، روی، بور، مس (۵۲) و حتی سلنیوم (۱۷) اشاره کرد. روی و فسفر نقش فیزیولوژیکی مهمی در ساختار و کارکرد غشاهای زنده و حفظ پایداری آن ایفا کرده (۲، ۸ و ۵۵) بر روابط آبی گیاه و باز و بسته شدن روزنه‌ها تأثیر می‌گذارند (۲۲، ۴۴ و ۵۵) و روی باعث محافظت غشاها در مقابل تنش اکسیداتیو[1] می‌شود (۸) و این کارکردها باعث بهبود جذب عناصر غذایی در شرایط تنش کمبود آب می‌شود.

برای ارزیابی کیفی سیب‌زمینی از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود که غلظت نشاسته و قندهای احیایی سیب‌زمینی از مهم‌ترین آن شاخص‌ها هستند و در ارزیابی‌ها برای فراوری سیب‌زمینی در صنایع غذایی استفاده می‌شوند؛ همچنین با توجه به سرانه مصرف سیب‌زمینی در ایران (بیش از ۴۵ کیلوگرم در سال) که بعد از گندم و برنج بیش‌ترین سهم را در سبد غذایی مردم کشور دارد (۱۱)، اطلاع از غلظت عناصر غذایی مختلف در این محصول مخصوصاً در شرایط مختلف رطوبت خاک بسیار مفید می‌باشد و با غنی‌سازی مواد غذایی پر مصرفی مانند سیب‌زمینی می‌توان گام مؤثری در راستای امنیت و سلامت غذایی مردم برداشت. در مورد تأثیر روی و فسفر بر رشد سیب‌زمینی و ترکیب شیمیایی آن در شرایط کمبود آب در ایران پژوهشی انجام نشده است. در پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر کمبود آب بر غلظت عناصر غذایی در سایر گیاهان هم نتایج متناقضی به‌دست آمده است. لذا، هدف از این پژوهش بررسی نقش تنش کمبود آب در تغییر غلظت عناصر غذایی غده و فاکتورهای کیفی آن و بررسی نقش عناصر غذایی روی و فسفر در کاهش اثرهای نامطلوب تنش کمبود آب بر ویژگی‌های کیفی سیب‌زمینی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت پوشان دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در طی سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ انجام شد. برای انجام پژوهش، خاکی مورد نیاز بود که دارای روی و فسفر قابل جذب کمتر از سطح بحرانی برای سیب‌زمینی یعنی روی قابل جذب کمتر از ۰/۷ mg/kg و فسفر قابل جذب کمتر از ۱۰ mg/kg باشد (۲) که این خاک با استفاده از اطلاعات موجود در گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز انتخاب شد. خاک مورد نظر از عمق ۳۰-۰ cm مزرعه‌ای واقع در روستای اسپیران در شمال غرب تبریز با طول جغرافیایی (''۵۳ '۱۹ °۴۶ شرقی) و عرض جغرافیایی (''۵۷ '۱۵ °۳۸ شمالی) تهیه و به گلخانه منتقل شد. مقداری از خاک مورد نظر هواخشک شده و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن شامل فسفر قابل جذب خاک به روش اولسن (۳۳)، Zn، Fe، Mn و Cu قابل جذب با روش عصاره‌گیری با DTPA (۲۶) و اندازه‌گیری غلظت آنها در عصاره با دستگاه جذب اتمی (Shimdzu مدل AA-6300)، بافت به روش هیدرومتری با چهار قرائت (۱۴)، کربن آلی به روش اکسایش تر (۴۵)، پتاسیم قابل جذب با عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال و pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱ آب به خاک و قابلیت هدایت الکتریکی در محلول ۱:۱ آب به خاک، کربنات کلسیم معادل خاک به‌روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود (۳۹) تعیین شد. سپس آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه عامل روی در سه سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی، $ZnSO_4.7H_2O$، تهیه شده از شرکت AppliChem)، فسفر در سه سطح (۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک خشک از منبع مونوکلسیم فسفات، $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$، تهیه شده از شرکت SIGMA-ALDRICH) و رطوبت خاک در سه سطح (۰/۹FC–FC، ۰/۸FC– ۰/۷FC و ۰/۶FC– ۰/۵FC) و با سه تکرار و در مجموع با ۸۱ گلدان اجرا شد. سطوح روی بر اساس مطالعات پک و مکدونالد (۳۴)، گونش و همکاران (۱۶)، تولالی و همکاران (۴۷)، کوللی و همکاران (۲۴) و ترهان و شرما (۴۹)، سطوح فسفر بر اساس پژوهش‌های جین و همکاران (۲۰)، رودریگوز و گودریان (۴۰) و نلسون و سفیر (۳۲) و سطوح تنش کمبود آب بر اساس پژوهش مسعودی و همکاران (۲۸) انتخاب شد. برای انجام پژوهش گلدان‌های ۱۰ لیتری با قطر دهانه ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر تهیه و قبل از پر کردن خاک در گلدان‌ها، بر اساس نتایج تجزیه خاک، ۵ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین ۱۳۸ آهن و ۵ میلی‌گرم منگنز از منبع سولفات منگنز به هر کیلوگرم خاک گلدان‌ها افزوده شد. نیتروژن به‌میزان ۲۰۰ میلی‌گرم از منبع اوره به هر کیلوگرم خاک گلدان‌ها در سه نوبت (نوبت اول قبل از کاشت و دو نوبت دیگر در روز ۱۰ام بعد از سبز شدن و شروع گلدهی) و هر نوبت یک سوم آن مصرف شد. همچنین فسفر و روی مورد نیاز هر تیمار به صورت محلول به خاک اضافه و با خاک هر گلدان کاملاً مخلوط شد. رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه رسانده

1- Oxidative stress

شد و معادل ۱۰ کیلوگرم از خاک مورد نظر با چگالی ظاهری خشک ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به هر یک از گلدان‌های ۱۰ لیتری ریخته شد. در هر گلدان دو غده بذری سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) رقم آگریا با اندازه یکنواخت (۵۵–۴۵ میلی‌متر) در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک کشت شد. هدف از کشت دو غده این بود که هم از احتمال حذف گلدان به‌علت مرگ بوته جلوگیری شود و هم برای اندازه‌گیری ویژگی‌هایی مانند مقدار نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ، فعالیت‌های آنزیمی و اندازه‌گیری عناصر غذایی نمونه کافی موجود باشد. موقعیت گلدان‌ها در داخل هر بلوک هفته‌ای یک یا دو بار و بین بلوک‌ها هفته‌ای یک بار برای جلوگیری از اثرهای حاشیه‌ای و غیر یکنواختی نور و دمای گلخانه جابجا شد. برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نمونه‌ای از خاک مورد نظر قبل از کشت توسط دستگاه صفحه فشاری[1] به مکش ۰/۳ بار رسانده شد و بلافاصله پس از خروج از دستگاه رطوبت وزنی آن اندازه‌گیری شد. سپس با در دست داشتن وزن خاک و گلدان در طول آزمایش، رطوبت خاک از طریق توزین و سپس آبیاری با استوانه مدرج به‌میزان لازم برای هر تیمار تنظیم شد که این کار در زمان آبیاری یکنواخت روزی یک‌بار و در زمان اعمال تیمارهای رطوبت خاک صبح و عصر انجام شد. همچنین در این پژوهش برای هر یک از سطوح رطوبت خاک تعدادی گلدان اضافی در نظر گرفته شد و در فواصل زمانی معین با اندازه‌گیری وزن ریشه و بخش هوایی تصحیح لازم در وزن گلدان‌ها با کم کردن وزن ریشه و بخش هوایی از وزن گلدان‌ها انجام شد. آبیاری کامل برای همه گلدان‌ها و به‌صورت یکنواخت به‌میزان ۵±۹۵ درصد ظرفیت مزرعه تا گلدهی کامل انجام (از روز اول تا روز ۶۴ بعد از کاشت) و تیمارهای رطوبت خاک از گلدهی اعمال و به‌مدت ۳ هفته ادامه یافت (روزهای ۶۴ تا ۸۵ بعد از کاشت).

در پایان دوره رشد، غده پس از برداشت ابتدا با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته شد. قبل از توزین، رطوبت اضافی آنها با دستمال کاغذی گرفته شد و با ترازوی ۰/۰۱± گرم وزن غده اندازه‌گیری شد. یک گرم از نمونه‌های غده کاملاً خشک شده در آون که قبلاً خرد شده و از الک ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شده بودند، با ترازوی ۰/۰۰۱± گرم توزین و در بوته‌های چینی ریخته شد. بوته‌ها در کوره الکتریکی قرار داده شدند و دمای کوره در مدت دو ساعت به تدریج به ۵۵۰ درجه سلسیوس رسانده شد. نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در این دما نگهداری شدند تا کاملاً خاکستر شده و به رنگ خاکستری مایل به سفید درآیند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از کوره، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول اسید کلریدریک و اسید نیتریک (۳۰۰ میلی‌لیتر HCl غلیظ و ۱۰۰ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ که مجموعاً با آب مقطر به حجم یک لیتر رسانده شد) به آن اضافه شد و در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد و از خشک شدن آن جلوگیری شد. پس از سرد شدن، محتویات بوته چینی با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ به داخل بالن ۵۰ میلی‌لیتری صاف و با آب مقطر به حجم رسانده شد (۵۴). در این عصاره غلظت فسفر، پتاسیم، سدیم، منیزیم، آهن و روی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نیتروژن از روش کجلدال استفاده شد (۵۰). برای اندازه‌گیری قندهای احیایی غده در بافت تازه سیب‌زمینی از روش معرف دی‌نیتروفنل (۲۹) و اندازه‌گیری نشاسته غده در پودر سیب‌زمینی از روش معرف آنترون (۲۹) استفاده شد.

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای MSTATC و SPSS انجام شد. ابتدا آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها انجام و در صورت نیاز از تبدیل مناسب برای داده‌های غیرنرمال استفاده شد. سپس مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام و شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

غلظت نیتروژن غده سیب زمینی

تجزیه واریانس نشان داد که به‌جز اثر اصلی روی و اثر متقابل دوجانبه رطوبت خاک×Zn بقیه اثرهای اصلی و متقابل عامل‌ها بر غلظت نیتروژن غده معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش متوسط کمبود آب باعث افزایش ۱۰ درصدی غلظت نیتروژن غده در مقایسه با آبیاری کامل شد ولی با افزایش تنش کمبود آب غلظت نیتروژن غده حتی از غلظت آن در تیمار آبیاری کامل هم کم‌تر شد (جدول ۳). با اعمال تنش شدید کمبود آب (کاهش رطوبت خاک) بر اثر کاهش جریان توده‌ای به سمت ریشه، کاهش معدنی شدن نیتروژن در خاک و افزایش تصاعد نیتروژن به‌علت کمبود آب، فراهمی نیتروژن برای گیاه کم‌تر شد و به‌دنبال آن غلظت نیتروژن غده کاهش یافت (۱۷ و ۲۷).

شکل ۱ نشان می‌دهد که بین رطوبت خاک و فسفر از نظر غلظت نیتروژن غده اثر متقابل آنتاگونیستی وجود داشت در حالی‌که در شرایط آبیاری کامل مصرف فسفر به‌علت افزایش عملکرد غده (شکل ۳) بر اثر وقوع پدیده اثر رقت (۲۷)، غلظت نیتروژن غده را کاهش داد. در تنش شدید کمبود آب، مصرف فسفر باعث افزایش جذب و توزیع نیتروژن در گیاه و غده شد و غلظت نیتروژن غده را افزایش داد. بیش‌ترین تأثیر فسفر مصرفی بر کاهش غلظت نیتروژن غده در شرایط تنش متوسط کمبود آب اتفاق افتاد. به‌نظر می‌رسد در شرایط تنش متوسط کمبود آب جذب نیتروژن کاهش یافته ولی عملکرد غده به آن نسبت کاهش نیافته است.

1- Pressure plate

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the studied soil

Cu	Mn	Zn	Fe	K	P	(1:1) EC (dS/m)	pH (1:1)	OC	FC	SP	CCE	گروه بافت Soil texture
(mg/kg)								(%)				
2.2	7.01	0.52	3.98	556	8.7	0.47	7	0.5	18.5	44.4	15.25	لوم رسی‌شنی Sandy clay loam

CCE: کربنات کلسیم معادل؛ OC: کربن آلی خاک؛ SP: درصد رطوبت اشباع خاک

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) غلظت عناصر غذایی و فاکتورهای کیفی غده سیب‌زمینی تحت اثر عامل‌های مختلف

Table 2- The analysis of variance for nutrients concentration and qualitative attributes of potato for different factors

منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی df	Zn	Fe	Mg	Na	K	P	N	عملکرد غده Yield	قندهای احیایی Reducing sugars	نشاسته Starch
تکرار Replication	2	46.18**	269.6^{ns}	3.33**	16.26^{ns}	0.185*	0.001^{ns}	0.35**	4122^{ns}	0.001^{ns}	1.16**
رطوبت خاک Soil moisture	2	2.33^{ns}	672**	0.358**	492**	0.07^{ns}	0.004**	0.41**	340617**	0.016**	22.97**
Zn	2	205**	542.7*	0.006^{ns}	28.23*	0.064^{ns}	0.000^{ns}	0.03^{ns}	5370^{ns}	0.001^{ns}	3.92**
Soil Zn×moisture	2	7.02^{ns}	12.4^{ns}	0.054^{ns}	8.35^{ns}	0.024^{ns}	0.001^{ns}	0.13^{ns}	8049*	0.001^{ns}	0.29^{ns}
P	2	0.58^{ns}	234.5^{ns}	0.018^{ns}	85.2**	0.001^{ns}	0.004**	0.32**	56364**	0.006*	3.89**
Soil P×moisture	2	17.78**	318.9*	0.011^{ns}	15.42^{ns}	0.04^{ns}	0.001^{ns}	0.33**	8472*	0.001^{ns}	0.05^{ns}
Zn×P	2	0.80^{ns}	170.8^{ns}	0.028^{ns}	4.52^{ns}	0.08^{ns}	0.002**	0.3**	655^{ns}	0.001^{ns}	0.12^{ns}
Soil ×P×moisture Zn	8	9.94*	76.6^{ns}	0.083^{ns}	8.97^{ns}	0.02^{ns}	0.000^{ns}	0.26**	5449^{ns}	0.001^{ns}	0.04^{ns}
خطا Error	52	3.51	129.9	0.09	8.23	0.04^{ns}	0.001	0.06	3298	0.001	0.18
ضریب تغییرات (%) C.V.		11.0	22.6	33.7	22.6	8.7	10.8	15.1	15.9	10.32	3.9

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال۵ و ۱٪

ns, * and **are non-significant, significant at $p\leq0.05$ and $p\leq0.01$, respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر غذایی و شاخص‌های کیفی غده سیب‌زمینی برای اثر اصلی رطوبت خاک، روی و فسفر

Table 3- Means comparison of nutrients concentration and qualitative attributes of potato under soil moisture, Zn and P main effects

عامل Factors	سطوح	Zn mg/kg) (dw	Fe mg/kg) (dw	Mg mg/g) (dw	Na mg/g) (dw	K (%)	P (%)	N (%)	عملکرد غده Yield (g/pot)	نشاسته Starch (%)	قندهای احیایی Reducing sugars (%)
رطوبت خاک Soil moisture	0.9FC –FC	17.4a	46.1b	1.00a	0.47a	2.28a	0.20b	1.66b	469.2a	11.7a	0.27b
	0.7FC –0.8FC	16.8a	55.9a	0.90ab	0.44a	2.29a	0.21ab	1.82a	368.2b	10.7b	0.30a
	0.5FC –0.6FC	17.0a	49.1b	0.77b	0.39b	2.38a	0.22a	1.57b	244.9c	9.8c	0.32a
Zn (mg/kg)	0	13.9b	45.4b	0.88a	0.40b	2.26a	0.21a	1.69a	350.0a	10.3c	0.29a
	10	18.4a	54.0a	0.91a	0.44ab	2.35a	0.21a	1.64a	354.7a	10.8b	0.30a
	20	18.9a	51.7a	0.88a	0.46a	2.33a	0.21a	1.71a	376.a	11.1a	0.30a
P (mg/kg)	0	17.1a	52.9a	0.86a	0.42a	2.32a	0.20b	1.78a	311.7c	10.4c	0.28b
	30	17.2a	47.1a	0.91a	0.43a	2.31a	0.21ab	1.70a	367.6b	10.7b	0.29ab
	60	16.9a	51.0a	0.90a	0.45a	2.32a	0.22a	1.56b	402.0a	11.1a	0.31a

در هر ستون شاخص، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند

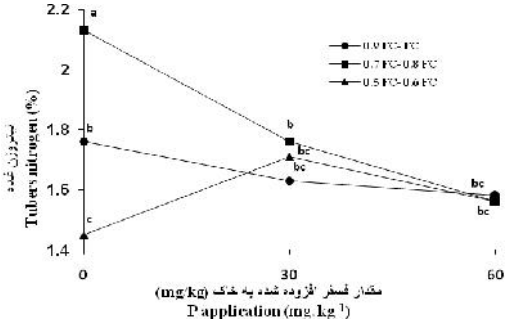
In a column of each experimental factors, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range test at $p\leq0.05$

درنتیجه، غلظت نیتروژن غده بر اثر وقوع پدیده اثر رقت کاهش یافته است. چنین شرایطی قبلاً توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (۱۷ و ۲۷). سامارا و مولن (۴۱) گزارش کردند که غلظت نهایی عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن بر اثر تنش کمبود آب، به نسبت کاهش جذب عنصر غذایی به کاهش وزن خشک گیاه بستگی دارد. اگر کاهش رشد شدیدتر از کاهش جذب باشد، عناصر غذایی تجمع می‌یابند و اگر کاهش جذب شدیدتر باشد غلظت عناصر غذایی کاهش می‌یابد. در شرایط تنش شدید کمبود آب کاهش رشد غده‌ها و تولید عملکرد (شکل ۳) احتمالاً سریع‌تر از کاهش جذب نیتروژن اتفاق افتاد (۲۷) و باعث افزایش غلظت نیتروژن غده شد (شکل ۱). به‌نظر می‌رسد در شرایط آبیاری کامل جذب نیتروژن و افزایش عملکرد (شکل ۳) بر اثر مصرف فسفر به یک اندازه اتفاق افتاد و در نتیجه غلظت نیتروژن غده نسبتاً ثابت ماند. کاهش شدید غلظت نیتروژن غده در شرایط تنش متوسط کمبود آب باعث شد که اثر اصلی فسفر بر غلظت نیتروژن غده معنی‌دار شده و غلظت نیتروژن غده با افزایش فسفر مصرفی کاهش یافت.

شکل ۲ نشان می‌دهد که بین فسفر و روی مصرفی از نظر غلظت نیتروژن غده اثر متقابل آنتاگونیستی وجود داشت. در شرایط عدم مصرف روی و مصرف ۱۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک، مصرف فسفر تأثیری بر غلظت نیتروژن غده نداشت ولی وقتی روی به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مصرف شد با مصرف فسفر غلظت نیتروژن غده کاهش معنی‌دار نشان داد و مقدار مصرف فسفر تأثیری بر این روند نداشت. سلطانپور (۴۶) و چاوری و بورنمیزا (۹) نشان دادند که روی و فسفر اثر متقابل منفی در عملکرد و جذب عناصر غذایی دارند؛ ولی ترهان و گروال (۴۸) گزارش دادند که مصرف متعادل روی و فسفر می‌تواند با انتقال مناسب‌تر محصولات فتوسنتزی از ریشه به غده‌ها، عملکرد را افزایش دهد.

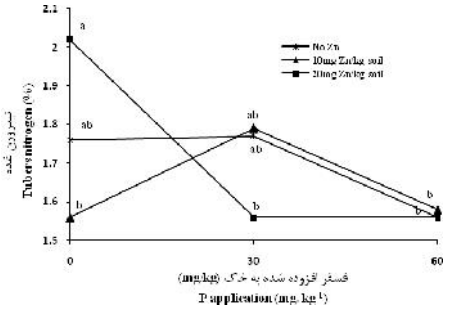
غلظت فسفر غده سیب زمینی

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی رطوبت خاک و فسفر و اثر متقابل دوجانبه Zn×P بر غلظت فسفر غده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ولی سایر اثرهای اصلی و متقابل بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۲).



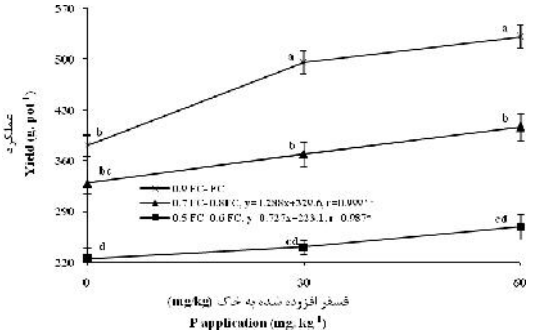
شکل ۱- مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن غده برای ترکیب‌های تیماری فسفر و رطوبت خاک

Figure 1- Means comparison of tubers nitrogen for combined treatments of P and soil moisture



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن غده برای ترکیب‌های تیماری فسفر و روی

Figure 2- Means comparison of tubers nitrogen for combined treatments of P and Zn



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های عملکرد غده سیب‌زمینی برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک و فسفر

Figure 3- Means comparison of potato tubers yield for combined treatments of P and soil moisture

با افزایش تنش کمبود آب غلظت فسفر غده افزایش یافت و این افزایش در شرایط تنش شدید کمبود آب به ۱۰ درصد رسید. بیش‌ترین غلظت فسفر غده (۰/۲۲ درصد) از شرایط تنش شدید کمبود آب و کم‌ترین آن (۰/۲۰ درصد) در شرایط بدون تنش کمبود آب یعنی از سطح رطوبت خاک ۰/۹FC–FC به‌دست آمد (جدول ۳). برعکس غلظت فسفر غده، با افزایش شدت تنش کمبود آب، جذب فسفر غده کاهش یافت (نتایج منتشر نشده است) که نشان می‌دهد که افزایش غلظت فسفر غده به‌دلیل اثر تغلیظ و کاهش شدید عملکرد غده بر اثر تنش کمبود آب می‌باشد (۲۷) ولی جذب کم‌تر فسفر در غده‌ها نشان می‌دهد که در شرایط تنش کمبود آب احتمالاً عمده فسفر جذب شده به مناطقی بیش‌تر منتقل شده است که بتواند اثرهای سوء تنش کمبود آب را با توجه به نقش‌هایش در تنش کمبود آب (افزایش هدایت روزنه‌ای (۵)، فتوسنتز (۱)، پایداری غشای پلاسمایی، روابط آبی گیاه (۴۳) و تحمل تنش کمبود آب) جبران نماید. با افزایش فسفر مصرفی غلظت فسفر غده افزایش یافت که با توجه به فراهمی بیش‌تر فسفر در خاک بر اثر مصرف کود فسفر، جذب بیش‌تر فسفر در اندام‌های مختلف گیاه کاملاً طبیعی بود.

اثر متقابل روی و فسفر بر غلظت فسفر غده در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مصرف فسفر فقط در شرایط عدم مصرف روی باعث افزایش معنی‌دار غلظت فسفر غده شد ولی در سطوح دیگر روی، مصرف فسفر تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر غده نداشت. این موضوع نشان می‌دهد که بین روی و فسفر از نظر غلظت فسفر غده اثر متقابل منفی وجود دارد که با نتایج پژوهش‌های سلطانپور (۴۶)، چاوری و بورنمیزا (۹) و ترهان و گروال (۴۸) مطابقت داشت.

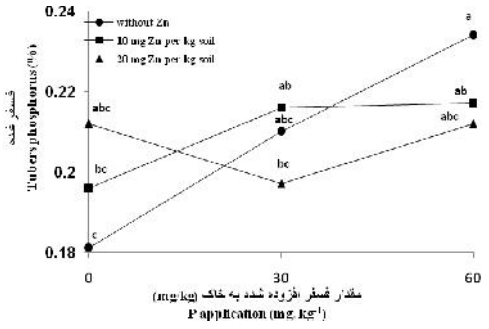
غلظت پتاسیم غده سیب زمینی

غلظت پتاسیم غده تحت تأثیر معنی‌دار هیچ‌یک از اثرهای اصلی و متقابل دوجانبه و سه‌جانبه عامل‌ها قرار نگرفت. غلظت پتاسیم غده سیب‌زمینی تحت تأثیر مصرف کود فسفر قرار نگرفت ولی جذب آن در اثر مصرف فسفر افزایش یافت که این افزایش به‌دلیل افزایش عملکرد غده سیب زمینی با مصرف کود فسفر بود (جدول ۳). به‌نظر می‌رسد که عدم تأثیر معنی‌دار تیمارهای مختلف بر غلظت پتاسیم غده سیب زمینی ناشی از این است که در تیمارهای مختلف سرعت جذب و انتقال پتاسیم به غده‌ها با سرعت رشد غده‌ها متناسب بوده است. در نتیجه، غلظت پتاسیم غده‌ها تغییر معنی‌داری نکرده است. شاید یکی از دلایل این پدیده فراوانی پتاسیم در خاک (جدول ۱) است که سبب شده غلظت پتاسیم غده‌ها از تیمارهای مختلف متأثر نشود.

غلظت سدیم غده سیب زمینی

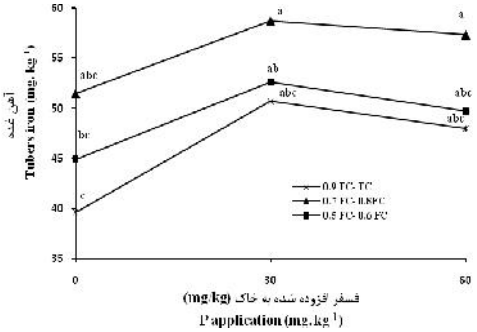
نتایج تجزیه واریانس غلظت سدیم غده سیب‌زمینی در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اثر اصلی رطوبت خاک در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی روی در سطح احتمال ۵ درصد بر غلظت سدیم غده سیب‌زمینی معنی‌دار بود ولی اثر اصلی فسفر، اثرهای متقابل دوجانبه رطوبت خاک×P، رطوبت خاک×Zn و Zn×P و اثر متقابل سه‌جانبه رطوبت خاک×Zn×P بر این عامل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود (جدول ۲).

مقایسه میانگین‌های غلظت سدیم غده برای اثر اصلی رطوبت خاک در جدول ۳ نشان داد که با افزایش شدت تنش کمبود آب غلظت سدیم غده سیب‌زمینی کاهش یافت. در شرایط تنش شدید کمبود آب غلظت سدیم غده سیب‌زمینی ۱۳ درصد در مقایسه با سطح رطوبت خاک ۰/۷FC–۰/۸FC و ۲۰ درصد در مقایسه با شرایط آبیاری کامل کاهش یافت و این در حالی بود که تفاوت دو سطح رطوبت خاک ۰/۷FC–۰/۸FC و ۰/۹FC–FC از نظر غلظت سدیم غده سیب‌زمینی معنی‌دار نبود (جدول ۳).



شکل ٤- مقایسه میانگین‌های غلظت فسفر غده برای ترکیب‌های تیماری فسفر و روی

Figure 4- Means comparison of tubers phosphorus for combined treatments of P and Zn



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های غلظت آهن غده برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک و فسفر

Figure 5- Means comparison of tubers Fe for combined treatments of P and soil moisture

کاهش غلظت سدیم غده بر اثر کمبود آب در خاک، احتمالاً به‌دلیل کاهش انتقال سدیم به ریشه‌ها از طریق جریان توده‌ای و اثر متقابل آنتاگونیستی پتاسیم و سدیم (چرا که جذب پتاسیم بر اثر تنش کمبود آب در این پژوهش زیاد شد و این ازدیاد باعث کاهش جذب سدیم شد) و کاهش انتقال آب جذب شده به غده‌ها بوده است (۱۷، ۲۷ و ۳۵). کاهش غلظت سدیم غده‌های سیب زمینی بر اثر کمبود آب در خاک نشان می‌دهد که احتمالاً کمبود آب در خاک سرعت جذب و انتقال سدیم به غده‌ها را بیشتر از سرعت رشد غده‌ها کاهش داده است.

با افزایش روی مصرفی غلظت سدیم غده‌های سیب‌زمینی نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و این افزایش در شرایط مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک ۱۵ درصد بود (جدول ۳). با توجه به جدول ۳، فقط تفاوت سطوح صفر و ۲۰ میلی‌گرم روی از نظر غلظت سدیم غده معنی‌دار بود و مصرف ۱۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک با هیچ‌یک از سطوح مصرفی روی تفاوت معنی‌دار نداشت. افزایش غلظت سدیم غده‌ها با مصرف کود روی احتمالاً به‌دلیل افزایش تعرق گیاه بوده است. چرا که روی با تأثیر بر روابط آبی گیاه هدایت روزنه‌ای برگ سیب‌زمینی را افزایش داده و باعث افزایش تبخیر و تعرق واقعی گیاه شد. افزایش تبخیر و تعرق گیاه باعث افزایش جذب آب و انتقال آن از بخش‌های مختلف خاک به سطح ریشه شد و سدیم بیشتری در اثر جریان توده‌ای به سطح ریشه رسید و باعث افزایش جذب آن در تمام بخش‌های گیاه شد. همچنین به‌دلیل انتقال بیشتر سدیم به بخش هوایی در اثر تبخیر و تعرق مقدار بیشتری از آن به غده‌ها انتقال یافت و با بررسی ضرایب همبستگی مشاهده شد که غلظت سدیم غده هم روندی مشابه با غلظت سدیم بخش هوایی داشت و با اکثر شاخص‌های رویشی (۴) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت چرا که بین سدیم بخش هوایی و سدیم غده همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($r=۰/۴۱۲^{*}$) وجود داشت (جدول ۴).

جدول ٤ – ضریب همبستگی میان غلظت عناصر غذایی غده، بخش هوایی و برخی ویژگی‌های رشدی سیب‌زمینی (برای ۸۱ داده)

Table 4 – Coefficient of regression between stem and tuber nutrients and some growth attributes of potato (n=81)

	وزن خشک ب S dry weight	عملکرد Yield	ارتفاع ساقه Stem height	کارایی مصرف آب WUE	نیتروژن ب S N	فسفر ب S P	سدیم ب S Na	منیزیم ب S Mg	نیتروژن غ T N	فسفر غ T P	سدیم غ T Na	منیزیم غ T Mg	هدایت روزنه‌ای SC	تبخیر و تعرق ET
وزن خشک ب S dry weight	1	0.588**	0.893**	0.472*	-0.367	0.232	0.569**	0.297	-0.006	0.380	0.429*	0.123	0.427*	0.467*
عملکرد Yield		1	0.807**	0.864**	-0.860**	-0.390*	0.759**	0.716**	0.064	-0.276	0.469*	0.567**	0.858**	0.962**
ارتفاع ساقه Stem height			1	0.637**	-0.610**	0.039	0.644**	0.524**	-0.070	0.162	0.551**	0.338	0.607**	0.730**
کارایی مصرف آب WUE				1	-0.779**	-0.468*	0.665**	0.574**	0.225	-0.284	0.380	0.446*	0.696**	0.731*
نیتروژن ب S N					1	0.321	-0.740**	-0.672**	-0.08	0.444*	-0.425	-0.563**	-0.826**	-0.840**
فسفر ب S P						1	-0.176	-0.193	-0.132	0.636**	-0.221	-0.231	-0.374	-0.399*
سدیم ب S Na							1	0.668**	-0.085	-0.228	0.412*	0.319	0.683**	-0.693**
منیزیم ب S Mg								1	0.094	-0.296	0.408*	0.477*	0.581**	0.744**
نیتروژن غ T N									1	-0.062	0.03	-0.028	0.226	0.240
فسفر غ T P										1	-0.134	-0.129	-0.274	-0.449
سدیم غ T Na											1	0.073	0.523**	0.547**
منیزیم غ T Mg												1	0.442*	0.625**
هدایت روزنه‌ای SC													1	0.862**
تبخیر و تعرق ET														1

بدون علامت، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ و ، ب= بخش هوایی، غ= غده

Without sign, * and **are non-significant, significant at p≤0.05 and p≤0.01, respectively and T= Tubers, S= Stem, ET= Evapotranspiration, SC= Stomatal conductivity and WUE= Water use efficiency

غلظت منیزیم غده سیب زمینی

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی رطوبت خاک در سطح احتمال یک درصد بر غلظت منیزیم غده معنی‌دار بود ولی اثرهای اصلی فسفر و روی، اثرهای متقابل دوجانبه رطوبت خاک×P، رطوبت خاک×Zn و Zn×P و اثر متقابل سه‌جانبه رطوبت خاک×Zn×P بر این عامل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود (جدول ۲).

در شرایط تنش شدید کمبود آب غلظت منیزیم غده سیب‌زمینی ۱۷ درصد در مقایسه با سطح رطوبت خاک ۰/۸FC–۰/۷FC و ۳۰ درصد در مقایسه با شرایط رطوبت خاک ۰/۹FC–FC کاهش یافت. تفاوت دو سطح رطوبت خاک ۰/۸FC–۰/۷FC و ۰/۹FC–FC از نظر غلظت منیزیم غده سیب‌زمینی معنی‌دار نبود (جدول ۳). به‌نظر می‌رسد کاهش غلظت منیزیم غده با افزایش شدت تنش کمبود آب به چند دلیل باشد: ۱) کاهش انتقال منیزیم به ریشه‌ها از طریق جریان توده‌ای که وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت منیزیم بخش هوایی و هدایت روزنه‌ای و تبخیر و تعرق (۳۰) این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۴) و با کاهش غلظت منیزیم در بخش هوایی انتقال آن به غده نیز کم شد، ۲) کاهش سرعت معدنی شدن مواد آلی و کاهش آزادسازی منیزیم به محلول خاک، ۳) کاهش فراهمی منیزیم خاک برای ریشه‌ها به‌دلیل رسوب منیزیم به شکل‌های مختلف در شرایط کمبود آب، ۴) اثر متقابل آنتاگونیستی پتاسیم و منیزیم چرا که غلظت پتاسیم ریشه و بخش هوایی بر اثر تنش کمبود آب زیاد شد و باعث کاهش غلظت منیزیم بخش هوایی و انتقال آن به غده شد (داده‌ها نشان داده نشده است)(۱۷، ۲۷ و ۳۵). یاسین‌اشرف و همکاران (۵۶) و رضایی و همکاران (۳۸) کاهش غلظت منیزیم را در ژنوتیپ‌های گندم در شرایط تنش کمبود آب گزارش نمودند درحالی‌که پریماچاندرا و همکاران (۳۶) بر روی ذرت و کیدمبی و همکاران (۲۳) بر روی یونجه و اسپرس افزایش غلظت منیزیم را با اعمال تنش کمبود آب گزارش کردند.

غلظت آهن غده سیب زمینی

اثر اصلی رطوبت خاک در سطح احتمال یک درصد و اثرهای اصلی روی و اثر متقابل دوجانبه رطوبت خاک×P در سطح احتمال ۵ درصد بر غلظت آهن غده معنی‌دار بود ولی اثر اصلی فسفر، اثرهای متقابل دوجانبه رطوبت خاک×Zn و Zn×P و اثر متقابل سه‌جانبه رطوبت خاک×Zn×P بر غلظت آهن غده در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود (جدول ۲). با افزایش شدت تنش کمبود آب غلظت آهن غده سیب‌زمینی افزایش یافت هر چند این افزایش فقط در تنش متوسط کمبود آب معنی‌دار شد. بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت آهن غده سیب‌زمینی به‌ترتیب در تنش متوسط کمبود آب با ۵۵/۸ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم ماده خشک گیاه و آبیاری کامل با ۴۶/۱ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم ماده خشک گیاه مشاهده شد. تنش متوسط کمبود آب در خاک باعث افزایش ۲۱ درصدی غلظت آهن غده در مقایسه با شرایط آبیاری کامل و ۱۴ درصدی آن در مقایسه با تنش شدید کمبود آب شد (جدول ۳). افزایش غلظت آهن در شرایط تنش متوسط کمبود آب احتمالاً به‌دلیل اثر تغلیظ (۲۷) بود چرا که عملکرد غده سیب‌زمینی در شرایط تنش متوسط کمبود آب در مقایسه با آبیاری کامل کاهش یافت (شکل ۳). با توجه به جریان مداوم شیره پرورده به غده، آهن انتقال یافته در مقدار کم غده توزیع و غلظت آهن غده در شرایط تنش متوسط کمبود آب افزایش یافت؛ اما در شرایط تنش شدید کمبود آب، به‌دلیل کاهش جذب و انتقال آهن به غده، غلظت و مقدار جذب آهن در غده کاهش یافت.

با افزایش مقدار کود روی مصرفی غلظت آهن غده‌ها افزایش یافت. کم‌ترین غلظت آهن غده‌ها (۴۵/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) در شرایط عدم مصرف روی مشاهده شد که در شرایط مصرف ۱۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک با حدود ۱۹ درصد افزایش به ۵۴/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم رسید. مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک نیز باعث افزایش حدود ۱۷ درصدی غلظت آهن غده در مقایسه با شرایط عدم مصرف شد و تفاوت بین سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک نیز از نظر این ویژگی معنی‌دار نبود؛ ولی مصرف ۱۰ میلی‌گرم روی باعث افزایش ۵ درصدی آن در مقایسه با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک شد.

در شرایط تنش کمبود آب مصرف کود فسفر تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن غده نداشت و در تمام سطوح کود فسفر از نظر غلظت آهن غده‌ها بین شرایط تنش متوسط و شدید کمبود آب تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد؛ هر چند افزایش قابل توجهی در غلظت آهن غده در هر دو این شرایط با مصرف فسفر مشاهده شد. در شرایط آبیاری کامل مصرف کود فسفر باعث افزایش معنی‌دار غلظت آهن غده نسبت به شاهد شد ولی تفاوت بین سطوح ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم فسفر از نظر غلظت آهن غده در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود. کم‌ترین غلظت آهن غده در شرایط آبیاری کامل و عدم مصرف فسفر (۳۹/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک) مشاهده شد که با ۴۸ درصد افزایش به ۵۸/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک غده در شرایط تنش متوسط کمبود آب و مصرف ۳۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک رسید. نوع اثر متقابل فسفر و رطوبت خاک به سطح فسفر مصرفی و رطوبت خاک اعمال شده بستگی داشت و در بازه فسفر مصرفی صفر تا ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک عمدتاً آنتاگونیستی و در شرایط مصرف ۳۰ تا ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک عمدتاً از نوع هم‌افزایی یا سینرژیستی بود (شکل ۵).

غلظت روی غده سیب زمینی

اثر اصلی روی و اثر متقابل دوجانبه رطوبت خاک×P در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل سه‌جانبه رطوبت خاک×Zn×P در سطح احتمال ۵ درصد بر غلظت روی غده معنی‌دار بود ولی اثرهای اصلی رطوبت خاک و فسفر و اثرهای متقابل دوجانبه Zn×P و رطوبت خاک×Zn بر غلظت روی غده در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود (جدول ۲).

با مصرف روی غلظت روی غده سیب‌زمینی افزایش یافت (جدول ۳). کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت روی غده سیب‌زمینی به‌ترتیب در شرایط عدم مصرف روی با ۱۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه و مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک با غلظت روی ۱۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه مشاهده شد. مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک باعث افزایش ۳۶ درصدی غلظت روی غده در مقایسه با شرایط عدم مصرف روی شد. تفاوت سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک از نظر غلظت روی غده در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبود و فقط تفاوت مصرف و عدم مصرف روی معنی‌دار شد. در شرایط مصرف روی غلظت آن در محدوده ریشه و محلول خاک افزایش یافته و جذب آن نیز به‌دلیل فراهمی بیشتر زیاد شد. افزایش غلظت روی غده با مصرف روی در مطالعات دیگری مانند ترهان و گروال (۴۸)، گزارش شده است.

غلظت نشاسته غده سیب زمینی

تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی رطوبت خاک، روی و فسفر در سطح احتمال یک درصد بر غلظت نشاسته غده معنی‌دار بود ولی هیچ‌یک از اثرهای متقابل دوجانبه و سه‌جانبه عامل‌های مورد مطالعه بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های غلظت نشاسته غده سیب زمینی نشان داد که اثر اصلی سطوح رطوبت خاک بر غلظت نشاسته غده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت خاک درصد نشاسته غده افزایش یافت و غلظت نشاسته غده از ۹/۸ درصد در تیمار تنش شدید کمبود آب به ۱۱/۷ درصد در آبیاری کامل افزایش یافت (جدول ۳). کاهش غلظت نشاسته در شرایط کمبود آب ممکن است به‌علت کاهش میزان فتوسنتز و تولید مواد قندی (۵)، کاهش هدایت روزنه‌ای (۳۰)، کاهش میزان تشکیل نشاسته و یا افزایش تخریب نشاسته بر اثر کمبود آب (۲۵) باشد.

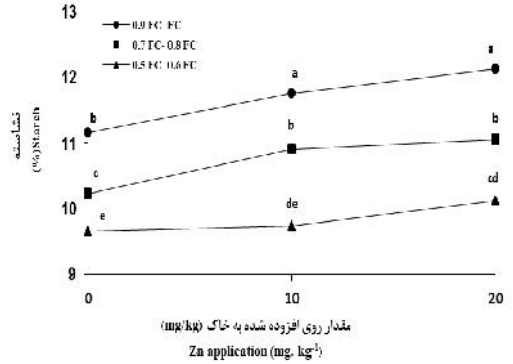
مقایسه میانگین‌های غلظت نشاسته غده برای اثر اصلی کود سولفات روی نشان داد که با افزایش روی مصرفی غلظت نشاسته غده افزایش یافت؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین غلظت نشاسته با مصرف ۲۰ میلی‌گرم روی بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (جدول ۳)؛ ولی شکل ۶ نشان می‌دهد که بین سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم روی از نظر نشاسته غده تفاوت معنی‌دار در هیچ‌یک از سطوح رطوبت خاک وجود نداشت ولی در شرایط تنش کمبود آب (متوسط و شدید) مصرف روی در مقایسه با عدم مصرف آن باعث افزایش غلظت نشاسته غده شد که نشان می‌دهد روی در شرایط تنش کمبود آب می‌تواند نقش قابل‌توجهی در ذخیره‌سازی نشاسته در غده‌ها داشته باشد. افزایش غلظت نشاسته غده بر اثر مصرف روی احتمالاً به‌علت نقش روی در فعال‌سازی گروه‌های آنزیمی مختلف، افزایش کربن‌گیری برگ‌ها (شدت فتوسنتز) و یا افزایش فعالیت آنزیم استارچ سینتتاز می‌باشد (۲۱).

مصرف ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنی‌دار غلظت نشاسته غده در مقایسه با عدم مصرف آن شد مصرف ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب باعث افزایش ۴ و ۸ درصد نشاسته غده در مقایسه با شرایط عدم مصرف فسفر شد و با افزایش مصرف فسفر، غلظت نشاسته غده به‌طور خطی افزایش یافت ($S=0.017(P)+10.38,\ r=0.996^{*}$) (جدول ۳). مصرف فسفر در تمام سطوح رطوبت خاک باعث افزایش غلظت نشاسته غده شد ولی بین سطوح رطوبت خاک و فسفر مصرفی اثر متقابل وجود نداشت (شکل ۷). در شرایط تنش کمبود آب بین سطوح ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی در سطوح رطوبت بیش‌تر تفاوت این دو سطح نیز معنی‌دار بود (شکل ۶). در تبدیل قند به نشاسته، فسفر یک عنصر مهم و ضروری به‌شمار می‌رود. تأمین فسفر مورد نیاز گیاه باعث تسهیل در تبدیل قندها به نشاسته می‌شود. مشاهده شده است که در غده‌های سیب‌زمینی فسفر تا ۴۰ درصد همراه با نشاسته است. فسفر از طریق فیتات‌ها در زمان رشد غده، در تنظیم ساختن نشاسته دخالت دارد (۲۷).

همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار بین عملکرد غده و درصد نشاسته سیب‌زمینی ($r=۰/۸۹۶^{**}$) نشان داد که نشاسته از عامل‌های مهم و تأثیرگذار در عملکرد سیب‌زمینی می‌باشد. هر قدر مقدار نشاسته سیب‌زمینی بیشتر باشد، نشان می‌دهد جریان مواد ذخیره‌ای به سمت غده‌ها زیادتر است در نتیجه عملکرد هم به همان نسبت افزایش می‌یابد (جدول ۳).

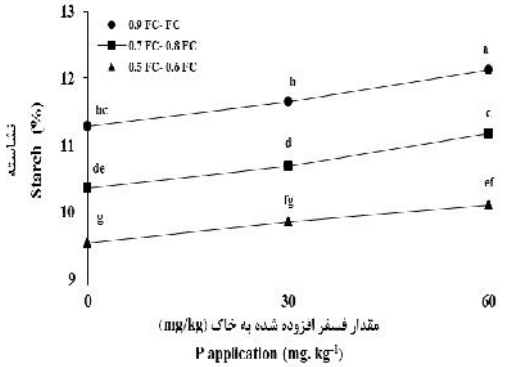
غلظت قندهای احیایی غده سیب زمینی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که به‌جز اثر اصلی رطوبت خاک و فسفر بقیه اثرهای اصلی و متقابل دوجانبه و سه‌جانبه بر غلظت قندهای احیایی غده‌های سیب زمینی معنی‌دار نبود (جدول ۲). با افزایش تنش کمبود آب و افزایش مصرف فسفر، غلظت قندهای احیایی غده افزایش یافت و این افزایش در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که غلظت قندهای احیایی در سطوح تنش شدید کمبود آب و ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک به‌ترتیب ۱۸ و ۱۰ درصد در مقایسه با آبیاری کامل و عدم مصرف فسفر افزایش یافت (جدول ۳).



شکل ٦- مقایسه میانگین‌های غلظت نشاسته غده برای ترکیب‌های تیماری روی و رطوبت خاک

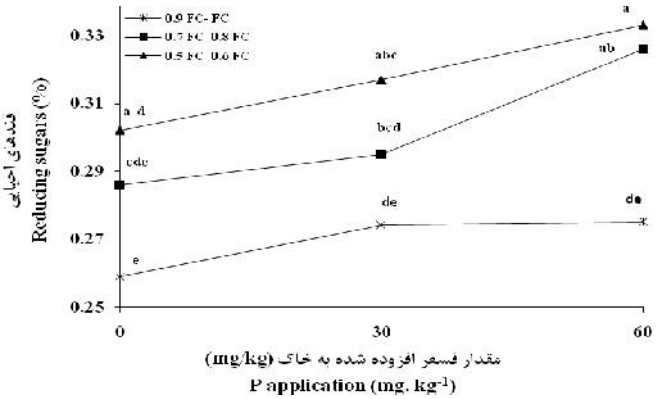
Figure 6- Means comparison of tubers starch for combined treatments of Zn and soil moisture



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های غلظت نشاسته غده برای ترکیب‌های تیماری فسفر و رطوبت خاک

Figure 7- Means comparison of tubers starch for combined treatments of P and soil moisture

شکل ۸ نشان می‌دهد که با مصرف فسفر غلظت قندهای احیایی روند افزایشی داشت ولی این افزایش فقط در سطح تنش متوسط کمبود آب معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که اثر متقابل فسفر و رطوبت خاک بر غلظت قندهای احیایی به سطح فسفر مصرفی و رطوبت خاک بستگی داشت. در بین سطوح تنش متوسط و شدید کمبود آب اثر متقابل فسفر و رطوبت خاک بر غلظت قندهای احیایی غده تا سطح ۳۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از نوع آنتاگونیستی و از سطح ۳۰ تا ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک از نوع هم‌افزایی یا سینرژیستی بود. کومار و همکاران (۲۵) به نقل از کولبه و همکاران (۱۹۹۵) هم گزارش نمودند که مصرف فسفر باعث افزایش غلظت قندهای احیایی غده شد. آنان دلیل این موضوع را ترجیح ذخیره گلوکز در شرایط مصرف فسفر در مقایسه با سایر قندها دانستند. تجمع قندهای احیایی در شرایط کمبود آب توسط پژوهشگران زیادی گزارش شده است. کومار و همکاران (۲۵) به نقل از ایشروود (۱۹۷۳) گزارش کردند که در شرایط تنش کمبود آب، به‌دلیل تجزیه نشاسته تشکیل شده، تشکیل نقاط با تجمع بالای قندهای ساده در داخل غده و افزایش فعالیت آنزیم ساکارز فسفات سینتتاز غلظت قندهای احیایی غده سیب‌زمینی افزایش یافت.



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های غلظت قندهای احیایی غده برای ترکیب‌های تیماری فسفر و رطوبت خاک

Figure 8- Means comparison of reducing sugars of tubers for combined treatments of P and soil moisture

نتیجه‌گیری کلی

در مجموع نتایج نشان داد که اثر اصلی روی بر غلظت سدیم، آهن و روی، اثر اصلی فسفر بر غلظت نیتروژن، فسفر، سدیم، نشاسته و قندهای احیایی و رطوبت خاک بر غلظت نیتروژن، فسفر، سدیم،

منیزیم، آهن، نشاسته و قندهای احیایی معنی‌دار بود. تنش کمبود آب باعث افزایش غلظت نیتروژن، فسفر و قندهای احیایی و کاهش غلظت سایر عناصر غذایی و نشاسته آن شد. اثرهای متقابل دوجانبه روی×فسفر و فسفر×رطوبت خاک از نظر غلظت عناصر غذایی معنی‌دار شده و عمدتاً از نوع آنتاگونیستی بود. مصرف روی غلظت سدیم، آهن و روی غده را افزایش داد ولی مصرف فسفر به جز نیتروژن تأثیری بر غلظت سایر عناصر غذایی غده‌های سیسب زمینی نداشت. نتایج نشان داد که مصرف فسفر و روی باعث افزایش غلظت نشاسته غده و کاهش قندهای احیایی آن شد و توانست اثرهای نامطلوب تنش کمبود آب بر این ویژگی‌ها را بهبود ببخشد. برای رشد بهینه سیب‌زمینی در خاک‌های مشابه خاک مورد استفاده در این پژوهش، در شرایط آبیاری کامل مصرف ۱۰ میلی‌گرم روی و ۳۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک می‌تواند توصیه شود در حالی‌که در شرایط تنش کمبود آب مصرف ۱۰ میلی‌گرم روی و ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک قابل‌توصیه می‌باشد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز به خاطر حمایت مالی در اجرای طرح پژوهشی شماره ۲۷/۲۶۴۰/ص که این مقاله حاوی قسمتی از نتایج آن است، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1- Ackerson R.C. 1985. Osmoregulation in cotton in response to water-stress. 3. Effects of phosphorus fertility. Plant Physiology, 77: 309-312.
2- Alloway B.J. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second Ed. Published by International Zinc Association (IAZ) and International Fertilizer Industry Association (IFA), France.
3- Anonymous. 2013. Hamedan province agricultural statistics. Jihade-Agriculture Organization of Hamedan, Hamedan, Iran.
4- Balemi T., and Schenk M.K. 2009. Genotypic variation of potato for phosphorus efficiency and quantification of phosphorus uptake with respect to root characteristics. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 172: 669-677.
5- Basu P.S., Sharma A., and Sukumaran N.P. 1998. Changes in net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in potato leaves induced by water stress. Photosynthetica, 35(1):13-19.
6- Bingru H. 2001. Nutrient accumulation and associated root characteristics in response to drought stress in tall fescue cultivars. Hort Science, 36(1): 48-152.
7- Brooks A. 1986. Effects of phosphorous nutrition on ribulose-1, 5-biphjosphate carboxylase activation, photosynthetic quantum yield and amount of some Calvin cycle metabolism in spanich leaves. Australian Journal of Plant Physiology, 13: 21-237.
8- Cakmak I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species (a review). New Phytologist, 146: 185-205.
9- Chaverri B.A., and Bornemisza E. 1977. Phosphorus-zinc interactions in the potato (*Solanum tuberosum* L.) crop in the Pacayas area. Agronomy Costar, 1(2): 83-92.
10- Deblonde P.M.K., and Ledent J.F. 2001. Effects of moderate drought conditions on green leaf number stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars. Europian Journal of Agronomy, 14: 31-41.
11- Eskandari A., Khazaie H.R., Nezami A., and Kafi M. 2011. Study the effects of irrigation regimes on yield and some qualitative characteristics of three cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). Journal of Water and Soil, 25(2): 240-247.
12- FAO. 2007. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available in: http://faostat.fao.org/statistics
13- Fleisher D.H., Barnaby J., Sicher R., Resop J.P., Timlin D.J., and Reddy V.R. 2012. Effects of elevated CO_2 and cyclic drought on potato under varying radiation regimes. Agricultural and Forest Meterology, 171-172: 270-280.
14- Gee G.W., and Bauder J.W.C. 1986. Particle size analysis. Pp. 383-412. In A. Klute (eds). Methods of Soil Analysis: Part1. Physical and Mineralogical Methods (2^{end} Ed.). Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5. Madison, WI, USA.
15- Germ M., Kreft I., Stibilj V., and Urbanc-Bercic O. 2007. Combined effects of selenium and drought on photosynthesis and mitochondrial respiration in potato. Plant Physiology Biochemistry, 45: 162-167.
16- Gunes A., Inal A., and Bagci E.G. 2009. Recovery of bean plants from boron-induced oxidative damage by zinc supply. Russian Journal of Plant Physiology, 56(4): 503-509.
17- Havlin J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L., and Nelson. W.L. 1999. Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management. Prentice Hall, USA.
18- Ierna A., and Mauromicale G. 2012. Tuber yield and irrigation water productivity in early potatoes as affected by

irrigation regime. Agricultural Water Management, 115: 276-284.
19- Jefferies R.A., and Mackerron D.K.L. 1993. Response of potato genotypes to drought. II. Leaf area index, growth and yield. Annals of Applied Biology, 122: 105-112.
20- Jin J., Wang G., Liu X., Pan X., Herbert S.J., and Tang C. 2006. Interaction between phosphorus nutrition and drought on grain yield, and assimilation of phosphorus and nitrogen in two soybean cultivars differing in protein concentration in grains. Journal of Plant Nutrition, 29(8): 1433-1449.
21- Jyung W.H., Ehmann A., Schlender K.K., and Scala J. 1975. Zinc nutrition and starch metabolism in *Phaseolus Vulgaris* L. Plant Physiology, 55: 414-420.
22- Khan H.R., McDonald G.K., and Rengel Z. 2004. Zinc fertilization and water stress affects plant water relations, stomatal conductance and osmotic adjustment in chickpea (*Cicer arientinum L.*). Plant and Soil, 267: 271-284.
23- Kidambi S.P., Matches A.G., and Bolger T.P. 1990. Mineral concentrations in alfalfa and sainfoin as influenced by soil moisture level. Agronomy Journal, 82: 229-236.
24- Koleli N., Eker S., and Cakmak I. 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil. Environmental Pollution, 131:453-459.
25- Kumar D., Singh B.P., and Kumar P. 2004. An overview of the factors affecting sugar content of potatoes. Annals of Applied Biology, 145: 247-256.
26- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of American Journal, 42: 421-428.
27- Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. (2nd Ed). Academic Press, USA.
28- Masoudi F., Zardashti M.R., Abdollahi Mandoulakani B., Rasouli Sadghiani M.H., and Nazarli H. 2010. Effect of irrigation intervals on yield and plant characteristics of potato (*Solanum tuberosum* L.). Iranian Journal of Crop Sciences. 12(3):265-278. (in Persian with English abstract).
29- Mostofi Y., and Najafi F. 2005. Laboratory Analytical Methods in Horticultural Sience.Tehran University Press, Tehran, Iran
30- Motalebifard R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., and Valizadeh M. 2013. The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions. Scientia Horticulturae, 162: 31-38.
31- Motalebifard R., Najafi N., Oustan S., Nyshabouri M.R., and Valizadeh M. 2014. Effects of soil moisture, phosphorus and zinc levels on the growth attributes of potato in greenhouse conditions. Iranian Soil and Water Research Journal, 45(1):75-85. (in Persian with English abstract)
32- Nelsen C.E., and Safir G.R. 1982. Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by improved phosphorus nutrition. Planta, 154: 407-413.
33- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939 US Gover. Prin. Office, Washington DC
34- Peck A.W., and McDonald G.K. 2010. Adequate zinc nutrition alleviates the adverse effects of heat stress in bread wheat. Plant and Soil, 337: 355-374.
35- Power J.F., and Prasad R. 1997. Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture. CRC Press, USA.
36- Premachandra G.S., Saneoka H., Fujita K., and Ogata S. 1990. Cell membrane stability and leaf water relation as affected by phosphorus nutrition under water stress in maize. Soil Science and Plant Nutrition, 36(4):653-659.
37- Radin J.W. 1984. Stomatal responses to water stress and to abscisic acid in phosphorous deficient cotton plants. Plant Physiology, 76: 392-394.
38- Rezaei M., Zehtab-Salmasi S., Najafi N., Ghassemi-Golezani K., and Jalalikamali M. 2010. Effects of water deficit on nutrient content and grain protein of bread wheat. Journal of Food Agriculture and Environment, 8(3&4): 132-136.
39- Richards L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. US Salinity Laboratory Staff, Agricultural Handbook No 60, USA.
40- Rodriguez D., and Goudriaan J. 1995. Effect of phosphorus and drought stress on dry-matter and phosphorus allocation in wheat. Journal of Plant Nutrition, 18(11): 2501-2517.
41- Samarah N., and Mullen R. 2004. Size distribution and mineral nutrients of soybean seeds in response to drought stress. Journal of Plant Nutrition, 27(5): 815-835.
42- Sardans J., Peñuelas J., Prieto P., and Estiarte M. 2008. Drought and warming induced changes in P and K concentration and accumulation in plant biomass and soil in a Mediterranean shrubland. Plant Soil, 306: 261-271.
43- Sawwan J., Shibli R.A., Swaidat I., and Tahat M. 2000. Phosphorus regulates osmotic potential and growth of african violet under in vitro-induced water deficit. Journal of Plant Nutrition, 23: 759-771.
44- Sharma P.N., Tripathi A., and Bisht S.S. 1995. Zinc requirement for stomatal opening in cauliflower. Plant Physiology, 107: 751-756.
45- Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabaei M.A., Johnson C.T., and Sumner M.E. 1996. Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5.

Madison, WI, USA.
46- Soltanpour P.N. 1969. Effect of N, P and Zn placement on yield and composition of potatoes. Agronomy Journal, 61: 288-289.
47- Tavallali V., Rahemi M., Maftoun M., Panahi B., Karimi S., Ramezanian A., and Vaezpour M. 2009. Zinc influence and salt stress on photosynthesis, water relations, and carbonic anhydrase activity in pistachio. Scientia Horticulturae, 123: 272-279.
48- Trehan S., and Grewal J. 1983. Zinc- phosphorus interaction in potato. Indian Journal of Ecology, 10(2): 215-222.
49- Trehan S.P., and Sharma R.C. 2003. Root–shoot ratio as indicator of zinc uptake efficiency of different potato cultivars. Communication in Soil Science and Plant Analysis, 34(7&8): 919-932.
50- Waling I., Vark W.V., Houba V.J.G., and Vanderlee J.J. 1989. Soil and Plant Analysis, a Series of Syllabi. Part 7. Plant Analysis Procedures. Wageningen Agriculture University, Netherland.
51- Wang H., Liu R.L., and Jin J.Y. 2009. Effects of zinc and soil moisture on photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence parameters of maize. Biologia Plantarum, 53(1): 191-194.
52- Waraich E.A., Amad R., Saifullah A., Ashraf M.Y., and Ehanullah R. 2011. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. Australian Journal of Crop Science, 5(6): 764-777.
53- WenTao M., and WeiGuo F. 2007. Effect of drought stress on mineral nutrient contents in leaves of seedlings of C. *tangerina Hort.*, C. *sinensis osbeck* and C. *grandis osbeck*. Southwest. China Journal of Agricultural Science, 20(4): 630-633.
54- Westerman L.Z. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5. Madison, WI, USA.
55- Yuncai H., and Schmidhalter U. 2005. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. Journal ofPlant Nutrition and Soil Science, 168:541-549.
56- Yasin-Ashraf M., Ala S.A., and Batti A. 1998. Nutritional imbalance in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes grown at soil water stress. Acta Physiologia Plantarum, 20: 307-310.
57- Zhaohui W., Shengxiu L., Cecil V.L., and Sukhdev S.M. 2005. Effects of water deficit and supplemental irrigation on winter wheat growth, grain yield and quality, nutrient uptake, and residual mineral nitrogen in soil. Communication in Soil Science Plant Analysis, 36(1): 1405-1419.
58- Zubaidi A., McDonald G.K., and Hollamby G.J. 1999. Nutrient uptake and distribution by bread and durum wheat under drought conditions in South Australia. Australian Journal of Experimental Agriculture, 39: 721-732.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 2, May.-Jun. 2016, p. 497-510

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۲، خرداد– تیر ۱۳۹۵، ص. ۵۱۰-۴۹۷

Effects of Zinc and Phosphorus on Nutrients, Starch and Reducing Sugar Concentrations of Potato Tubers under with or without Water Deficit Stress

R. Motalebifard [1*]- N. Najafi[2] - SH. Oustan[3]

Received: 07-10-2014
Accepted: 18-04-2015

Introduction: In natural environments, plants are subjected to biotic (insects, bacteria, fungi, and viruses) and abiotic (light, temperature, water availability, nutrients, and soil structure) stresses that can have negative effect on growth, metabolism, and yield. Among these, drought is a major abiotic factor that limits agricultural crop production. Potato production has fourth rank in the world after rice, wheat, and maize with the production of 321 million tons from 19.6 million hectares. By about 3 percent of cultivation area, potato had 7.2 percent of total agricultural production (5.57 million tons) in our country (Iran). Limited studies have been conducted on the interactive effects of Zn and P on potato tubers quality under water deficit conditions.

Materials and Methods: This study was conducted for evaluating the effects of soil moisture, phosphorus (P) and zinc (Zn) levels on the chemical composition and nutrients content of potato (*Solanum tuberosum* L. cv. Agria) as a factorial experiment based on randomized complete blocks design with three factors under greenhouse conditions. The study was performed with factors of Zn at three levels (0, 10 and 20 mg Zn per kg dry soil as $ZnSO_4.7H_2O$), P at three levels (0, 30 and 60 mg P per kg dry soil as $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ (monocalcium phosphate)) and soil moisture at three levels (0.5FC-0.6FC, 0.7FC-0.8FC and 0.9FC-FC) using three replications and 81 pots. The soil moisture levels were imposed three weeks from the flowering (64^{th} day) until harvest (85^{th} day after planting). After imposing of soil moisture levels and at the harvest, the yield and yield components, reducing sugars concentration in fresh weight by di- nitro phenol method (Mostofi and Najafi, 2005) and starch by Antron method (Mostofi and Najafi, 2005), N, P, K, Mg, Na, Fe and Zn concentrations in dried potato tubers were measured. Data were subjected to analysis of variance as factorial 3×3×3 with n=3 by using MSTATC software. Duncan's multiple range tests at $p\leq0.05$ probability level was applied to compare the mean values of measured attributes. The Excel software was used to draw Figures.

Results and Discussion: The results showed that water deficit significantly affected most of qualitative attributes and nutrients concentration of potato Tuber N, P and reducing sugar concentrations were significantly increased (p <0.05) with reducing soil moisture content. This increase was 10, 10 and 18 percent for severe water deficit condition (0.5 FC - 0.6 FC) comparing with full irrigated level (0.9 FC - FC), respectively. Severe water deficit condition reduced tuber Na, Mg, Fe and starch concentrations, 20, 30, 21 and 20 percent comparing with full irrigated condition. The imposed soil moisture levels had no significant effect on tuber K and Zn concentrations. Zn application significantly affected Na, Fe, Zn and starch concentration of potato tubers but had no significant effect on N, P, K, Mg and reducing sugars concentrations. Application of 20 mg Zn per kg soil increased significantly (p <0.05) tuber starch, Na, Fe and Zn concentrations by 15, 14, 36 and 8 percent comparing with without Zn application, respectively. Phosphorus usage also affected significantly N, P, reducing sugars and starch concentrations of potato tubers while had no significant effect on K, Mg, Na, Fe and Zn concentrations. Application of 60 mg P per kg soil decreased significantly (p <0.05) tuber N concentration (14 percent) and increased starch, reducing sugars and P concentrations (8, 11 and 10 percent, respectively) of potato tubers comparing with without P application condition. Two way interaction of P × soil moisture was significant on tubers P, N, Fe and Zn concentration. Also, two way interaction of P × Zn was significant on tubers P and N concentration. Three way interaction of P × Zn × soil moisture was significant on tubers N and Zn concentration too. The results showed that the two way interactions of Zn, P and soil moisture were mainly synergistic on the most of above mentioned attributes that significantly were affected by imposed factors.

Conclusion: The results showed that water deficit imposing had adverse effects on tubers quality and P and perhaps Zn requirement enhanced by increasing of water deficit. In general, to achieve the optimum potato tuber yield in similar soils, application of 10 mg Zn and 30 mg P per kg dry soil would be recommended under normal irrigation conditions while at water deficit conditions application of 10 mg Zn and 60 mg P per kg dry soil could be recommended.

Keywords: Drought Stress, Quality of Potato Tuber, Soil Moisture

1- Assistant Professor, Hamedan Agricultural and Natural Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran
(*- Corresponding Author Email: motalebifard@gmail.com)
2 and 3- Associate Professors, Deptartment of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran