تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳ (ص ۸۶-۷۵)

اثر رطوبت خاک، فسفر و روی بر ویژگی‌های رشد سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای

رحیم مطلبی‌فرد*[۱]، نصرت‌اله نجفی[۲]، شاهین اوستان[۳]، محمدرضا نیشابوری[۴] و مصطفی ولیزاده[۵]

۱. دانشجوی دکتری، ۲. دانشیار، ۳. دانشیار، ۴. استاد و ۵. استاد گروه علوم خاک و استاد گروه
به‌نژادی و بیوتکنولوژی کشاورزی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱۵- تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۱/۲۱)

چکیده

برای بررسی تأثیر سطوح رطوبت خاک، روی (Zn) و فسفر (P) بر ویژگی‌های رشد سیب‌زمینی(Solanum tuberosum L.) رقم آگریا، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و با سه فاکتور کود Zn در سه سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی)، کود P در سه سطح (۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک از منبع مونوکلسیم فسفات) و رطوبت خاک در سه سطح (۰/۹FC تا FC، ۰/۷FC تا ۰/۸FC و ۰/۵FC تا ۰/۶FC) در شرایط گلخانه‌ای و یک خاک لومی‌رسی آهکی و با سه تکرار اجرا شد. ویژگی‌های تعداد ساقه و برگ، طول ساقه و برگ، شاخص کلروفیل، مقاومت روزنه‌ای، مقدار نسبی آب برگ و وزن خشک بخش هوایی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت تنش کمبود آب ارتفاع ساقه، طول برگ، هدایت روزنه‌ای، وزن خشک بخش هوایی، مقدار نسبی آب برگ و شاخص‌کلروفیل برگ‌ها به‌طور معناداری کاهش یافت (P<۰/۰۱). با مصرف P تعداد برگ، طول ساقه، طول برگ، هدایت روزنه‌ای و وزن خشک بخش هوایی به‌طور معناداری افزایش یافت. مصرف کود Zn سبب افزایش معنادار طول ساقه، طول برگ، شاخص کلروفیل، هدایت روزنه‌ای و وزن خشک بخش هوایی شد (P<۰/۰۱). اثر متقابل رطوبت خاک×P و رطوبت خاک×Zn بر هدایت روزنه‌ای و شاخص کلروفیل و اثر متقابل سه‌جانبهٔ آن‌ها بر شاخص کلروفیل، هدایت روزنه‌ای و وزن خشک بخش هوایی معنادار شد (P<۰/۰۵). اثرهای متقابل دوجانبه Zn، P و رطوبت خاک از نظر ویژگی‌های بررسی‌شده عمدتاً سینرژیستی بود. به‌طورکلی، برای رشد مطلوب سیب‌زمینی در خاک‌های مشابه، در شرایط آبیاری کامل مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۳۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و در شرایط تنش کمبود آب مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک می‌تواند توصیه شود.

کلیدواژگان: سیب‌زمینی، رطوبت خاک، روی، فسفر، ویژگی‌های رشد.

مقدمه

در شرایط طبیعی گیاهان با تنش‌های مختلفی مواجه می‌شوند که این تنش‌ها می‌توانند بر رشد، متابولیسم و عملکرد محصولات مختلف تأثیر منفی داشته باشند. در این میان، تنش کمبود آب مهم‌ترین تنش غیرزیستی است که تولید محصولات کشاورزی را در سطح دنیا محدود می‌سازد (Reddy *et al*., 2004). در بین محصولات کشاورزی سیب‌زمینی با تولید سالیانه ۳۲۱ میلیون تن بعد از برنج، گندم و ذرت چهارمین محصول کشاورزی مهم دنیاست (FAO, 2007) که به‌علت سیستم ریشهٔ سطحی، به تنش کمبود آب بسیار حساس است و در شرایط تنش کمبود آب عملکرد ساقه، ریشه و غدهٔ آن به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. تنش کمبود آب سبب کاهش سطح برگ و ارتفاع ساقه (Deblonde and Ledent, 2001) و شدت فتوسنتز (Germ *et al*., 2007) می‌شود. کمبود آب، فتوسنتز و تولید مادهٔ خشک گیاه را از طریق بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در فتوسنتز کاهش می‌دهد (Shilpi and Tuteja, 2005; Germ *et al*., 2007). تنش کمبود آب به‌علت کاهش تورژسانس سلول‌ها و ممانعت از رشد آن‌ها سبب کاهش توسعهٔ سطح برگ می‌شود. از طرفی تغذیهٔ متعادل گیاه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود اثرهای سوء تنش کمبود آب داشته باشد. در این مورد می‌توان به عناصری مانند K، P، Zn و حتی سلنیوم (Se) اشاره کرد (Germ *et al*., 2007). یکی از آسیب‌های تنش کمبود آب افزایش نفوذپذیری غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه و نشت آن است که این افزایش در شرایط کمبود Zn تشدید می‌شود. در حیوانات و گیاهان، Zn نقش فیزیولوژیکی مهمی در ساختار و کارکرد غشاهای زنده ایفا می‌کند (Cakmak, 2000). همچنین Zn در شرایط تنش کمبود

* نویسنده مسئول: motalebifard@gamil.com

آب بر روابط آبی گیاه تأثیر می‌گذارد. وضعیت تغذیهٔ Zn می‌تواند روابط آبی گیاه را متأثر کرده و هدایت روزنه‌ای را تغییر دهد. Sharma *et al.* (1995) نقش Zn را در تنظیم بازشدن روزنه‌ها گزارش کردند. Zn نقش خود را با حفظ غلظت بالای K در سلول‌های محافظ روزنه انجام می‌دهد. مصرف P و یا کاربرد روش‌هایی برای افزایش جذب آن می‌تواند در کاهش اثر تنش کمبود آب مفید باشد. جذب P توسط گیاه در شرایط تنش کمبود آب کاهش می‌یابد. Torner (1985) اشاره کرد که کمبود P یکی از اولین اثرهای کمبود آب ملایم تا متوسط در گیاهان است. بنابراین، مصرف کود P می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی رشد گیاهان را در چنین شرایطی بهبود دهد. تأثیر مثبت P بر افزایش رشد گیاهان در شرایط کمبود آب به‌علت افزایش کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز، پایداری بالای دیوارهٔ سلولی و تأثیر آن در روابط آبی گیاه است (Yuncai and Schmidhalter, 2005). Sardans *et al.* (2008) اظهار داشتند که کاهش غلظت P در گیاهان مرتعی به‌علت کاهش میزان رطوبت خاک، کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک و ریشه و ظرفیت فتوسنتز بود که ظرفیت جذب P گیاه را کاهش داد. مطالعات محدودی دربارهٔ اثر متقابل Zn و P بر عملکرد و ویژگی‌های کیفی گیاهان زراعی مختلف در ایران مانند مطالعهٔ Rafiee *et al.* (2004) وOroji and Golchin (2012) انجام شده است ولی مطالعه در این زمینه و در شرایط تنش کمبود آب بسیار محدود است. بنابراین، با توجه به نقش Zn در پایداری غشاهای پلاسمایی و روابط آبی گیاه و جلوگیری از تأثیر سوء گونه‌های فعال اکسیژن و تأثیر مثبت P در افزایش رشد گیاهان در این شرایط به‌علت افزایش کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز، پایداری بالای دیوارهٔ سلولی و تأثیر آن در روابط آبی گیاه، پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر توأم Zn، P در شرایط تنش کمبود آب بر ویژگی‌های رشد سیب‌زمینی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت‌پوشان دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه تبریز طی سال زراعی ۱۳۹۰ـ۱۳۹۱ انجام شد. برای انجام پژوهش، خاکی مورد نیاز بود که دارای Zn و P قابل‌جذب کمتر از حد بحرانی برای سیب‌زمینی یعنی Zn قابل جذب کمتر از ۰/۷ mg/kg و P قابل‌جذب کمتر از ۱۰ mg/kg باشد (Jones, 2001; Allowey, 2008) که این خاک با استفاده از اطلاعات موجود در گروه علوم خاک دانشگاه تبریز انتخاب شد. خاک مورد نظر از عمق ۰ـ ۳۰ 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 P قابل‌جذب خاک به روش اولسن (Jones, 2001)، Zn، Fe، Mn و Cu قابل جذب با روش عصاره‌گیری با DTPA (Spark *et al.*, 1996) و اندازه‌گیری با دستگاه جذب اتمی (Shimdzu مدلAA-6300)، بافت به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Spark *et al.*, 1996)، K قابل‌جذب 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 تیترکردن با سود (Spark *et al.*, 1996) تعیین شد. آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور Zn در سه سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی، $ZnSO_4.7H_2O$ تهیه‌شده از شرکت AppliChem)، P در سه سطح (۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک خشک از منبع مونوکلسیم فسفات، $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ تهیه‌شده از شرکت SIGMA-ALDRICH) و سطوح رطوبت خاک در سه سطح (۰/۹FC تا FC، ۰/۷FC تا ۰/۸FC و ۰/۵FC تا ۰/۶FC) و با سه تکرار و درمجموع با ۸۱ گلدان اجرا شد. سطوح Zn و P با توجه به ویژگی‌های گیاه سیب‌زمینی و نیاز آن و تخمین میزان جذب آن طی دورهٔ رشد و با توجه به مطالعات Koleli *et al.* (2004)، Tavallali *et al.* (2009)، Gunes & Bagci (2009) وPeck & McDonald (2010) برای Zn، و مطالعات Nelsen & Safir (1982)، Rodriguez & Goudriaan(1995) و Jin *et al.* (2006) برای فسفر، انتخاب شد. رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) با استفاده از دستگاه صفحات تحت فشار در مکش ۰/۳ بار تعیین شد (Kirkham, 2004). براساس نتایج آزمون خاک، ۵ میلی‌گرم Fe از منبع سکوسترین ۱۳۸ آهن و ۵ میلی‌گرم Mn 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 قسط مصرف شد. در زمان تهیهٔ خاک‌های با سطوح رطوبت مختلف برای گلدان‌ها ترکیبات کودی روی و فسفر مختلف و آهن، منگنز و اورهٔ یکسان تهیه و به آب استفاده‌شده برای تهیهٔ سطوح رطوبتی در حجم مشخص اضافه شد. سپس آب مورد نظر با ۱۰ کیلوگرم خاک تمام گلدان‌ها

تک‌به‌تک اضافه و کاملاً یکنواخت شد و سپس داخل گلدان ریخته شد. در هر گلدان دو غدهٔ بذری سیب‌زمینی (Solanum tuberosum L.) رقم آگریا کشت شد. رطوبت خاک گلدان‌ها تا شروع گلدهی در ۵±۹۴درصد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. سطوح مختلف رطوبت خاک از جمله تیمارهای تنش کمبود آب از شروع گلدهی و به مدت سه هفته اعمال شد. در مدت اعمال تیمارهای رطوبت خاک برای مشخص‌شدن شدت تنش واردشده به گیاه مقاومت روزنه‌ای (cm/s) توسط دستگاه پرومتر AP4 (DELTA - T DEVICES-U.K.) در همهٔ گلدان‌ها در وسط روز (Zhang and Davies, 1989) و در ابتدا و انتهای اعمال تیمارهای سطوح رطوبت خاک و مقدار نسبی آب برگ در انتهای اعمال تیمارهای رطوبت خاک در وسط روز اندازه‌گیری شد. برای این منظور نمونه‌های تهیه‌شده از هر واحد آزمایشی (برگ‌های کامل) بلافاصله توزین و داخل آب مقطر قرار داده شد تا کاملاً اشباع شوند. بعد از ۱۲ ساعت دوباره توزین و به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۶۵ درجهٔ سلسیوس قرار داده شد تا خشک شود و از طریق فرمول زیر مقدار نسبی آب برگ محاسبه شد (Riahinia *et al*., 2006).

$$\text{مقدار نسبی آب برگ} = \frac{\text{وزن برگ خشک} - \text{وزن برگ تر}}{\text{وزن برگ خشک} - \text{وزن برگ آماس کرده}} \times ۱۰۰$$

بعد از پایان اعمال تیمارهای سطوح رطوبت خاک، ویژگی‌های ارتفاع ساقه میانگین فاصله از سطح خاک گلدان (طوقه) تا محل اتصال پتیول آخرین برگ به ساقه (Debolende and Ledent, 2001) ، تعداد برگ، طول برگ و شاخص کلروفیل برگ‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری شاخص کلروفیل برگ‌ها از دستگاه کلروفیل‌سنج مدل CL-01 ساخت شرکت Hansatech انگلستان استفاده شد. به این منظور، از هر گلدان ۵ برگ در موقعیت‌های مشابه انتخاب و مقدار کلروفیل آن‌ها با استفاده از دستگاه فوق تعیین شد و نهایتاً میانگین این اعداد به‌عنوان عدد کلروفیل‌متر مربوط به آن گلدان ثبت شد (Borzooei *et al*., 2006). در طول آزمایش رطوبت خاک گلدان‌ها از طریق توزین کنترل شد. این کار در طول پژوهش هر روز و در زمان اعمال سطوح رطوبت خاک صبح و عصر انجام می‌شد. در پایان، تجزیهٔ آماری داده‌های به‌دست‌آمده با نرم‌افزار MSTATC و مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵درصد انجام شد و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در این آزمایش در جدول۱ ارائه شده است.

جدول۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در آزمایش

گروه بافت	CCE	SP	FC	OC	pH	EC (1:1)	P	K	Fe	Zn	Mn	Cu
	٪				(1:1)	(dS/m)	(mg/kg)					
لوم رسی	۱۵/۲۵	۴۴/۴	۱۸/۵	۰/۵	۷	۰/۴۷	۸/۷	۵۵۶	۳/۹۸	۰/۵۲	۷/۰۱	۲/۲

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

هدایت روزنه‌ای: همان‌طور که در جدول۲ مشاهده می‌شود اثرهای اصلی رطوبت خاک و P و اثرهای متقابل رطوبت خاک×Zn، رطوبت خاک×P، P×Zn در سطح احتمال یک‌درصد و P×Zn×رطوبت خاک در سطح احتمال ۵درصد بر هدایت روزنه‌ای معنادار شد. تنش کمبود آب سبب کاهش هدایت روزنه‌ای شد به‌طوری‌که بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای (cm/s ۰/۸۷) از تیمار ۰/۹FC تا FC (آبیاری کامل) و کمترین آن (cm/s ۰/۳۴) از تیمار ۰/۵FC تا ۰/۶FC (تنش شدید کمبود آب) به دست آمد (جدول۳). کاهش هدایت روزنه‌ای بر اثر کاهش مصرف آب یکی از راهکارهایی است که گیاه به کار می‌گیرد تا از کاهش پتانسیل آب و تغییر روابط آبی جلوگیری کند. گیاه کنترل روزنه‌ها را در شرایط تنش کمبود آب با تولید بیشتر آبسزیک اسید در ریشه انجام می‌دهد و تولید آبسزیک اسید بیشتر منجر به بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای در گیاه می‌شود (Zhang and Davies, 1989). کاهش هدایت روزنه‌ای بر اثر تنش کمبود آب با مطالعات زیادی از جمله Westigate & Grant (1989) و Samarah & Mullen (2006) مطابقت داشت. هدایت روزنه‌ای یکی از ویژگی‌های استفاده‌شده برای ارزیابی تنش واردشده بر گیاه بود و با توجه به این ویژگی و ویژگی‌هایی مانند پتانسیل آب برگ و تبخیر و تعرق واقعی گیاه (Motalebifard *et al*., 2013) مشخص شد که با کاهش رطوبت خاک گیاه تحت تنش قرار گرفت و بیشترین میزان تنش کمبود آب در تیمار ۰/۵FC تا ۰/۶FC مشاهده شد. همچنین با مصرف P هدایت روزنه‌ای ابتدا افزایش ولی در سطح سوم P مجدداً کاهش یافت (جدول۳).Sekiya & Yano (2008) گزارش کردند که با کمبود P تعداد روزنه‌ها در برگ سیب‌زمینی

کاهش یافت. بنابراین، کاهش هدایت روزنه‌ای برگ در عدم مصرف P احتمالاً به‌علت کاهش تعداد روزنه‌های برگ بود. همچنین Radin (1984) گزارش کرد که گیاهان دارای کمبود P اسید آبسزیک (ABA) بیشتری را در برگ‌ها تجمع دادند که منجر به بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای شد. مقایسهٔ میانگین‌های هدایت روزنه‌ای برای ترکیب‌های تیماری Zn و رطوبت خاک نشان داد که کمترین میزان هدایت روزنه‌ای از تیمارهای تنش شدید و بیشترین مقدار هدایت روزنه‌ای (۱ cm/s) در تیمار آبیاری کامل و مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک به دست آمد (شکل۱). نتایج نشان داد که در تنش متوسط و شدید سطوح مختلف Zn از نظر هدایت روزنه‌ای در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند ولی با آبیاری کامل بین سطوح Zn اختلاف معناداری به‌وجود آمد و با مصرف Zn هدایت روزنه‌ای افزایش یافت. سطح تغذیه Zn توانست روابط آبی گیاه را متأثر کرده و هدایت روزنه‌ای را تغییر دهد. Sharma *et al.* (1984) گزارش کردند که کمبود Zn در کاهو پتانسیل اسمزی را کاهش و کسری اشباع آبی (Water saturation deficit) را در مقایسه با گیاهان رشدکرده در شرایط Zn کافی افزایش داد. آنان گزارش کردند که هدایت روزنه‌ای و شدت تعرق در شرایط کمبود Zn کاهش یافت. Sharma *et al.* (1995) نقش Zn را در تنظیم بازشدن روزنه‌ها گزارش کردند. Zn نقش خود را با حفظ غلظت بالای K در سلول‌های محافظ روزنه انجام داد. وقتی گیاه در شرایط تنش کمبود آب قرار گرفت چون این عامل اثر شدیدتری بر هدایت روزنه‌ای داشت مصرف Zn قادر نبود بر تنش کمبود آب غلبه کند که با نتایج Sharma *et al.* (1984) و Khan *et al.* (2004) مغایرت نشان داد درحالی‌که ناتوانی Zn بر بهبود اثرهای تنش کمبود آب با نتایج پژوهش‌های Wang *et al.* (2009) مطابقت داشت. نتایج نشان داد که اثر متقابل Zn و رطوبت خاک بر هدایت روزنه‌ای سینرژیستی است. مقایسهٔ میانگین‌های هدایت روزنه‌ای برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک و P نشان داد که بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای (۰/۹۷ cm/s) از تیمار آبیاری کامل و مصرف ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و و کمترین آن (۰/۳۱ cm/s) از تیمار تنش شدید رطوبت خاک و عدم مصرف P به دست آمد (شکل ۲). مصرف P در تمام سطوح رطوبت خاک مخصوصاً در آبیاری کامل و تنش شدید کمبود آب سبب افزایش میزان هدایت روزنه‌ای شد که بیانگر توانایی P در افزایش هدایت روزنه‌ای در شرایط نرمال و تنش کمبود آب بود. با توجه به بحث اثر اصلی، P قادر بود هدایت روزنه‌ای را با افزایش تعداد روزنه در واحد سطح (Sekiya and Yano, 2008)، تجمع کمتر ABA و باز و بسته شدن روزنه‌ها (Radin, 1984) انجام دهد. اثر متقابل P×رطوبت خاک بر هدایت روزنه‌ای سینرژیستی بود.

مقایسهٔ میانگین‌های هدایت روزنه‌ای برای ترکیب‌های تیماری Zn و P و رطوبت خاک نشان داد که بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای از تیمار آبیاری کامل و مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۳۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و کمترین آن از تیمار تنش شدید و عدم مصرف Zn و P به دست آمد (جدول۴) و مصرف توأم Zn و P در افزایش هدایت روزنه‌ای بسیار مؤثر بود و اثر بارزتری داشت که با توجه به نقش Zn در روابط آبی گیاه، تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها و هدایت روزنه‌ای و نقش P در افزایش تعداد روزنه‌ها، تجمع کمتر ABA و تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها قابل انتظار بود. همچنین نقش Zn وقتی بارزتر بود که مصرف P به سطوح ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک افزایش یافت و درواقع بین Zn و P در شرایط تنش کمبود آب از نظر تأثیر بر هدایت روزنه‌ای رابطهٔ سینرژیستی وجود داشت.

شاخص کلروفیل برگ‌ها: اثرهای اصلی رطوبت خاک و Zn و اثرهای متقابل رطوبت خاک×P، P×Zn و P×Zn×رطوبت خاک بر شاخص کلروفیل معنادار شد (جدول۲). با افزایش تنش کمبود آب شاخص کلروفیل از ۲۴/۸ در تیمار آبیاری کامل به ۴۰/۰۹ در تنش شدید کمبود آب افزایش یافت که این افزایش به‌ویژه در تیمار ۰/۵FC تا ۰/۶FC روند شدیدتری به خود گرفت (جدول۳). افزایش شاخص کلروفیل در شرایط تنش با مشاهدات گلخانه‌ای مطابقت داشت چراکه گیاهانی که تحت تنش قرار گرفته بودند، رنگ تیره‌تری نسبت به گیاهان رشدکرده در آبیاری کامل داشتند. این نتایج بیانگر آن است که در شرایط تنش رشد و توسعهٔ شاخ و برگ بیشتر از تشکیل و افزایش کلروفیل تحت‌تأثیر قرار گرفته است و کاهش شدید رشد شاخسارها در کنار عدم کاهش ساخت کلروفیل سبب تجمع کلروفیل شده و رنگ تیره‌تری به گیاهان رشدکرده در شرایط تنش داده است. Yasin-Ashraf *et al.* (1998) گزارش کردند که بر اثر تنش کمبود آب جذب و انتقال عناصری مانند N، K و P کاهش یافت و رشد گیاه خیلی بیشتر از تولید کلروفیل کاهش نشان داد. درنتیجه، بر اثر وقوع پدیده اثر تغلیظ غلظت کلروفیل در برگ‌ها افزایش یافت (Marschner, 1995). با توجه به اینکه ارتباط کاملی بین شاخص کلروفیل و غلظت کلروفیل‌های a و b وجود دارد بعضی از پژوهشگران گزارش کردند که تنش کمبود آب سبب کاهش غلظت کلروفیل‌های a و b در گیاه شد (Darvish-Boluchi *et al*, 2010). وجود اختلاف

دربارهٔ تأثیر کمبود آب بر شاخص کلروفیل احتمالاً به توانایی گیاه در مواجهه با شرایط تنش کمبود آب برمی‌گردد. اگر گیاه سرعت رشد خود را در شرایط تنش حفظ کند، تنش سبب کاهش تولید کلروفیل شده و شاخص کلروفیل کاهش پیدا می‌کند ولی اگر رشد گیاه شدیداً کاهش یابد کلروفیل تجمع و شاخص کلروفیل افزایش می‌یابد. با مصرف Zn شاخص کلروفیل از ۲۹/۸ در تیمار عدم مصرف Zn به ۳۳/۱۶ در تیمار مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول۳). افزایش غلظت کلروفیل با مصرف Zn به این علت بود که Zn نقش غیرقابل‌انکاری در تولید پروتئین با فعال کردن آنزیم‌هایی مانند RNA پلی‌مراز دارد (Marschner, 1995) و عدم وجود پروتئین کافی مانع از تشکیل کمپلکس پروتئین- کلروفیل شده و با کاهش فعالیت عادی کلروفیل شاخص کلروفیل کاهش یافته و رنگ گیاه زردتر شد. مقایسهٔ میانگین‌های شاخص کلروفیل برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک و P نشان داد که کمترین شاخص کلروفیل (۲۲/۶) از تیمار آبیاری کامل و مصرف ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و بیشترین آن (۴۰/۳۸) از تیمار تنش شدید و مصرف ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک به دست آمد (شکل۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش کمبود آب و کمبود P سبب تیره‌ترشدن گیاه و افزایش شاخص کلروفیل شد چرا که در هر دو شرایط میزان انبساط سلول و برگ کندتر از تشکیل کلروفیل بود و به‌علت اثر تغلیظ شاخص کلروفیل افزایش یافت (Marschner, 1995). همان‌طور که در شکل۴ مشاهده می‌شود بین میانگین‌های سطوح P در تنش‌های متوسط (۰/۷FC تا ۰/۸FC) و شدید کمبود آب اختلاف معنادار وجود نداشت درحالی‌که در آبیاری کامل سطوح P از نظر شاخص کلروفیل برگ در گروه‌های آماری مختلف قرار گرفتند. این نتایج نشان داد که تنش کمبود آب بیشتر از عدم مصرف فسفر شاخص کلروفیل را تحت‌تأثیر قرار داد و درواقع اثر P بر شاخص کلروفیل در شرایط آبیاری کامل بارزتر بود. این موضوع با اثر کمبود آب بر کاهش قابلیت جذب و مصرف عناصری غیر از P قابل توجیه است. نتایج نشان داد که اثر متقابلP×رطوبت خاک بر شاخص کلروفیل برگ سینرژیستی بود. مقایسهٔ میانگین‌های شاخص کلروفیل برای ترکیب‌های تیماری Zn و P نشان داد که کمترین میزان شاخص کلروفیل (۲۹/۴۲) از تیمار عدم مصرف Zn و P و بیشترین آن (۳۵/۵۱) از تیمار عدم مصرف P و مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک به دست آمد (شکل۵). تمام تیمارهای کودی سطوح اول و دوم Zn در یک گروه آماری قرار گرفتند و بین آن‌ها از نظر شاخص کلروفیل تفاوتی وجود نداشت. تفاوت زمانی به وجود آمد که Zn به میزان ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مصرف شد. در این سطح Zn بین سطوح P از نظر شاخص کلروفیل تفاوت وجود داشت. این نتایج نشان داد که سطح بالای Zn کمبود P را تشدید کرد و بین سطح بالای Zn و سطوح P اثرهای متقابل آنتاگونیستی وجود داشت درحالی‌که وقتی Zn به‌میزان کم مصرف شد این اثر متقابل مشاهده نشد. همچنین با مقایسهٔ میانگین‌های شاخص کلروفیل برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک، Zn و P مشاهده شد که بیشترین میزان شاخص کلروفیل (۴۳/۸۷) از تیمار تنش شدید رطوبتی و مصرف ۱۰ میلی‌گرم Zn و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و کمترین آن (۲۱/۴) از تیمار آبیاری کامل و مصرف ۱۰ میلی‌گرم Zn و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک به دست آمد (جدول۴) که نمایانگر کاهش دو برابری شاخص کلروفیل در تیمار آبیاری کامل در مقایسه با تنش شدید بود.

جدول۲. تجزیهٔ واریانس (میانگین مربعات) ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در سیب‌زمینی رقم آگریا

منابع تغییر	درجهٔ آزادی	تعداد ساقه	تعداد برگ	طول ساقه	طول برگ	شاخص کلروفیل	هدایت روزنه‌ای	وزن خشک بخش هوایی	مقدار نسبی آب برگ
تکرار	۲	۰/۸۲۷^{ns}	۱۲۵/۴۲^{ns}	۱۵/۸۵^{ns}	۰/۲۷^{ns}	۳۴/۸۷^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۳/۲۰^{ns}	۸/۲۸^{ns}
رطوبت خاک	۲	۳/۰۴۹^{ns}	۱۱۹/۱۶^{ns}	۳۴۰/۴۳**	۲/۳۴**	۱۶۵۳/۶**	۱/۸۶**	۳۰/۶۳*	۱۲۱/۹۴**
Zn	۲	۳/۴۹۴^{ns}	۷۶/۷۵^{ns}	۷۶/۹۱**	۰/۵۷*	۷۶/۲۷**	۰/۰۴۹**	۷۳/۱۰**	۱۰/۲۵^{ns}
رطوبت خاک ×Zn	۴	۱/۰۶۷^{ns}	۴۷/۵۵^{ns}	۲۰/۰۴^{ns}	۰/۰۴۵^{ns}	۱/۷۳^{ns}	۰/۰۷۳**	۳/۵۷^{ns}	۸/۴۹^{ns}
P	۲	۰/۹۰۱^{ns}	۲۶۲/۶۸*	۵۶۳/۹۲**	۳/۶۸**	۱/۹۲^{ns}	۰/۱۵۷**	۳۳۰/۶۵**	۲۱/۱۴^{ns}
رطوبت خاک ×P	۴	۱/۹۷۵^{ns}	۵۶/۵۳^{ns}	۲۲/۸۴^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۳۵/۲۵*	۰/۱۲۲**	۶/۹۸^{ns}	۲۹/۶۳*
Zn×P	۴	۰/۹۲^{ns}	۲۶/۴۶^{ns}	۶/۰۷^{ns}	۰/۱۳^{ns}	۲۶/۹۳*	۰/۰۸۸**	۹/۷۶^{ns}	۰/۷۱^{ns}
رطوبت خاک ×Zn×P	۸	۲/۷۹۹^{ns}	۱۰۴/۷۲^{ns}	۱۵/۹۹^{ns}	۰/۲۲^{ns}	۲۵/۱*	۰/۰۴۱*	۱۴/۹۶*	۹/۷۲^{ns}
خطا	۵۲	۲/۱۷۳	۸۳/۳۳	۱۳/۸۳	۰/۱۳۵	۱۱/۸۲	۰/۰۱۹	۶/۲۶	۹/۶۲
ضریب تغییرات (٪)		۲۲/۹	۲۱/۵۴	۹/۵۸	۸/۹۴	۱۰/۹۲	۲۲/۷	۱۴/۴۱	۳/۶۴

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵درصد و ۱درصد

در این پژوهش غلظت کلروفیل برگ اندازه‌گیری نشد ولی نیتروژن برگ اندازه‌گیری شد و با بررسی همبستگی‌ها مشاهده شد که بین شاخص کلروفیل و درصد نیتروژن برگ ضریب همبستگی مثبت و معنادار وجود دارد (SPAD=13.62*N + 1.029, r= 0.83**). این موضوع نشان می‌دهد که بین شاخص کلروفیل و نیتروژن برگ رابطهٔ قوی وجود دارد و چون عمده پروتئین برگ در ارتباط با کلروفیل است (Marshner, 1995) شاخص کلروفیل ارتباط معناداری با غلظت کلروفیل برگ دارد. هرچند در این پژوهش غلظت کلروفیل برگ اندازه‌گیری نشد ولی ارتباط معنادار این دو ویژگی در مطالعات دیگر اثبات شده است.

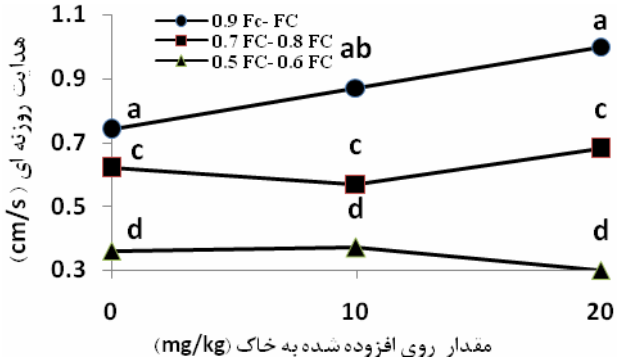
تعداد ساقه و برگ سیب‌زمینی: تجزیهٔ واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و متقابل Zn، P و رطوبت خاک بر تعداد ساقه غیرمعنادار بود (جدول۲) هرچند که مصرف Zn سبب افزایش غیرمعنادار تعداد ساقه شد و این افزایش به ۱۵درصد رسید (جدول۳). تعداد ساقه از فاکتورهایی است که به‌شدت تحت‌تأثیر رقم قرار دارد و تعداد چشم‌های موجود روی غده تعیین‌کنندهٔ تعداد ساقه است به‌طوری که Nielson et al. (1989) ضریب همبستگی ۰/۷۴ را بین تعداد چشم‌های روی غده و تعداد ساقه گزارش کردند. از طرفی تعداد ساقه از فاکتورهای تعیین‌کنندهٔ عملکرد و اجزای عملکرد سیب‌زمینی است به‌طوری‌که Lemaga & Caesar (1990) همبستگی مثبتی را بین تعداد ساقه و ویژگی‌های تعداد و عملکرد غده مشاهده کردند.

اثر اصلی P بر تعداد برگ سیب‌زمینی معنادار ولی اثرهای اصلی Zn و رطوبت خاک و اثرهای متقابل دوجانبه و سه‌جانبه Zn، رطوبت خاک و P بر تعداد برگ غیرمعنادار بود (جدول۲). با افزایش سطح P مصرفی تعداد برگ افزایش یافت و بیشترین تعداد برگ در تیمار ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۱۵درصد افزایش یافت (جدول۳). با افزایش مصرف P ارتفاع ساقه به‌ترتیب ۱۴ و ۲۷ درصد در سطوح ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک افزایش یافت و این افزایش یکی از دلایل اصلی افزایش تعداد برگ بود. تأثیر مثبت P بر تعداد برگ با نتایج پژوهش‌های Colomb *et al.* (2000) در ذرت مطابقت داشت. بااین‌حال، نتایج Rafiee *et al.* (1993) نشان داد که P تأثیری بر تعداد برگ ذرت ندارد.

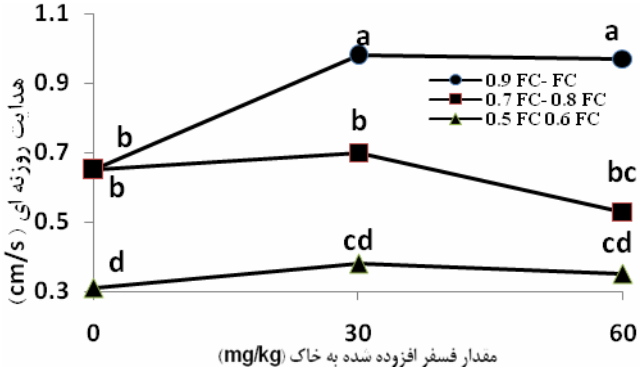
جدول۳. مقایسهٔ میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ سیب‌زمینی در سطوح مختلف رطوبت خاک، Zn و P

فاکتور	سطوح	شاخص کلروفیل	تعداد ساقه	تعداد برگ	هدایت روزنه‌ای (cm/s)	وزن بخش هوایی (g/pot)	طول ساقه (cm)	طول برگ (cm)	مقدار نسبی آب برگ (%)
رطوبت خاک	۰/۹FC تا FC	۲۴/۸۰c	۵/۴۱a	۴۳/۴۴a	۰/۸۷a	۱۸/۳۹a	۴۲/۵۱a	۴/۳۸a	۸۷/۴۳a
	۰/۷FC تا ۰/۸FC	۲۹/۵۴b	۴/۷۴a	۳۹/۹۶a	۰/۶۲b	۱۷/۴۵ab	۳۸/۴۸b	۴/۱۴a	۸۴/۸۸b
	۰/۵FC تا ۰/۶FC	۴۰/۰۹a	۵/۰۰a	۴۳/۷۴a	۰/۳۴c	۱۶/۲۹b	۳۵/۴۲c	۳/۷۹b	۸۳/۲۱b
Zn (mg/kg)	۰	۲۹/۸۰b	۴/۷۴a	۴۰/۶۷a	۰/۵۸b	۱۶/۱۰b	۳۷/۷۰b	۳/۹۵b	۸۴/۶۴a
	۱۰	۳۱/۴۸ab	۵/۴۴a	۴۲/۴۴a	۰/۶۰ab	۱۶/۷۸b	۳۷/۹۶b	۴/۱۳ab	۸۵/۸۵a
	۲۰	۳۳/۱۶a	۴/۹۶a	۴۴/۰۴a	۰/۶۶a	۱۹/۲۳a	۴۰/۷۵a	۴/۲۴a	۸۵/۰۲a
P (mg/kg)	۰	۳۱/۶۵a	۴/۹۶a	۳۸/۸۲b	۰/۵۴b	۱۳/۶۱c	۳۴/۱۲c	۳/۷۰b	۸۶/۱۳a
	۳۰	۳۱/۶۱a	۵/۲۶a	۴۳/۷۴ab	۰/۶۹a	۱۷/۹۷b	۳۹/۰۵b	۴/۱۸a	۸۴/۳۹a
	۶۰	۳۱/۱۷a	۴/۹۷a	۴۴/۵۹a	۰/۶۱ab	۲۰/۵۳a	۴۳/۲۵a	۴/۴۳a	۸۵/۰۰a

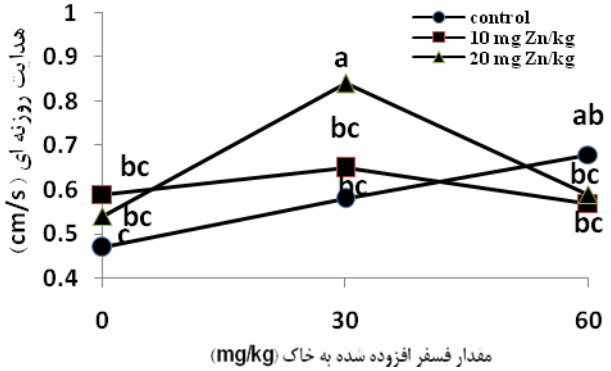
در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنادار ندارند ($p<۰/۰۵$).



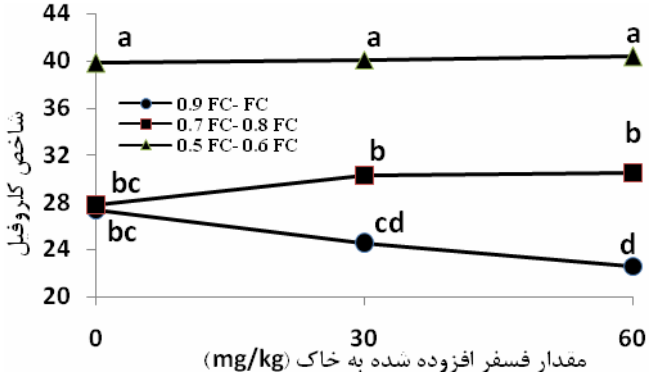
شکل۱. اثر متقابل رطوبت خاک و Zn بر هدایت روزنه‌ای برگ



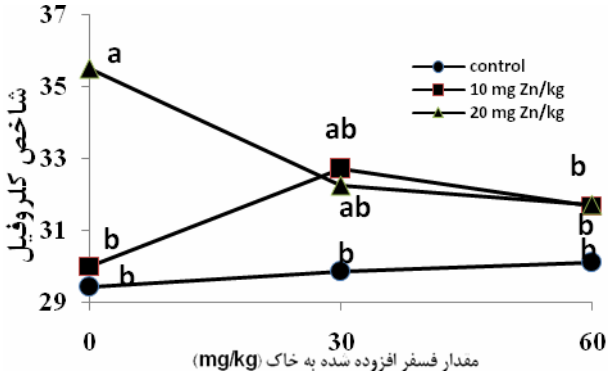
شکل۲. اثر متقابل رطوبت خاک و P بر هدایت روزنه‌ای برگ



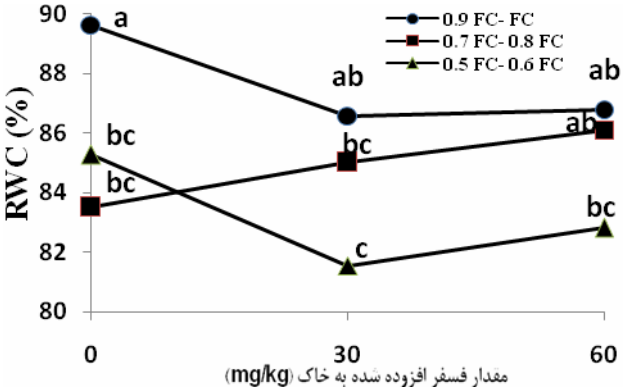
شکل۳. اثر متقابل P و Zn بر هدایت روزنه‌ای برگ



شکل۴. اثر متقابل رطوبت خاک و P بر شاخص کلروفیل برگ



شکل۵. اثر متقابل P و Zn بر شاخص کلروفیل برگ



شکل۶. اثر متقابل رطوبت خاک و P بر مقدار نسبی آب برگ

طول ساقه: اثرهای اصلی Zn، P و رطوبت خاک بر طول ساقه معنادار ولی اثرهای متقابل رطوبت خاک، Zn و P بر طول ساقه غیرمعنادار بود (جدول۲). با افزایش تنش طول ساقه از ۴۲/۵۱ cm در شرایط آبیاری کامل با ۲۰درصد کاهش به ۳۵/۴۲ cm در شرایط تنش شدید رسید (جدول۳). کمبود آب میزان جذب و انتقال عناصر غذایی از ریشه به بخش هوایی را کاهش داد چون پخشیدگی عناصر غذایی از خاک به سطح ریشه و میزان تعرق گیاه را کم کرد و به انتقال فعال و تراوایی غشا آسیب رساند (Yuncai and Schmidhalter, 2005). این عامل‌ها سبب شد که بر اثر تنش کمبود آب رشد گیاه، ارتفاع و مادهٔ خشک آن کاهش یابد. این نتایج مشابه نتایج Debolende and Ledent (2001) بود. آنان گزارش کردند که طول ساقه یکی از حساس‌ترین ویژگی‌ها به تنش کمبود آب بود و با تنش متوسط طول ساقه کاهش معناداری پیدا کرد. طول ساقه یکی از فاکتورهای مهم در سیب‌زمینی است و ارتباط مناسبی بین آن و عملکرد سیب‌زمینی در مطالعات به‌خصوص در شرایط آبیاری کامل به دست آمده است (Debolende and Ledent, 2001). مصرف P طول ساقه را با ۲۷درصد افزایش از ۳۴/۱۲ cm در تیمار شاهد به ۴۳/۲۵ cm در تیمار ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک افزایش داد (جدول۳). کمبود P در سیب‌زمینی از رشد و توسعهٔ برگ جلوگیری و سبب توسعهٔ شاخه‌های جانبی و کاهش ارتفاع ساقه شد. در شرایط P کافی کربوهیدرات‌ها و مواد فتوسنتزی به مقدار کافی به ساقه رسید و کمبود آن توسعهٔ ساقه را محدود کرد (McArthur and Knowles, 1993). سطوح Zn از نظر طول ساقه در گروه‌های آماری مختلف قرار گرفتند و کمترین طول ساقه (۳۷/۷ cm) در تیمار شاهد و بیشترین آن (۴۳/۲۵ cm) از تیمار مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول۳). Zn در فعال‌سازی تعداد زیادی از آنزیم‌ها (Alloway, 2008)، سنتز پروتئین، کربوهیدرات‌ها و اکسین، تنظیم متابولیسم ساکاریدها، اسیدهای نوکلئیک و چربی‌ها، بیوسنتز کلروفیل نقش ایفا می‌کند (Marschner, 1995). همه این عامل‌ها سبب شد در شرایط Zn کافی طول ساقه افزایش معنادار پیدا کند.

طول برگ سیب‌زمینی: اثرهای اصلی رطوبت خاک، Zn و P بر طول برگ معنادار شد (جدول۲). طول برگ با ۱۶درصد کاهش از ۴/۳۸ cm در تیمار آبیاری کامل به ۳/۷۹cm در تیمار تنش شدید کمبود آب رسید (جدول۳). طول برگ تحت‌تأثیر تنش متوسط کمبود آب قرار نگرفت هرچند که کاهش غیرمعنادار در

طول برگ در شرایط تنش متوسط مشاهده شد. Debolende & Ledent (2001) هم تأثیر تنش کمبود آب بر طول برگ را فقط در شرایط تنش شدید مشاهده کردند. Weisz *et al.* (1994) نیز گزارش کردند که وقتی آب قابل‌استفاده گیاه در خاک ۴۰درصد کاهش یافت طول برگ کاهش نشان داد. کاهش طول برگ با افزایش تنش کمبود آب احتمالاً به‌علت اثر تنش کمبود آب بر قابلیت جذب و انتقال عناصر غذایی و تأثیر آن بر فیزیولوژی گیاه است. مشاهده شد که تنش کمبود آب هدایت روزنه‌ای را کاهش داد و این کاهش شدت فتوسنتز و تولید مادهٔ خشک را کاهش داد و کاهش ماده خشک سبب تجمع بیشتر کلروفیل و افزایش شاخص کلروفیل شد. مقایسهٔ میانگین‌های اثر اصلی Zn نشان داد که طول برگ از ۳/۹۵ cm در تیمار شاهد به ۴/۲۴ cm در تیمار مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول۳). با توجه به نقش Zn در فعال‌سازی تعداد زیادی آنزیم و سنتز تریپتوفان، Zn سبب طویل‌شدن طول برگ شد (Marschner, 1995). اثر Zn بر طویل‌شدن ساقه هم مشاهده شد و ارتفاع ساقه هم بر اثر مصرف Zn افزایش یافت. مصرف Zn سبب افزایش هدایت روزنه‌ای و شاخص کلروفیل برگ‌ها شد که همه این عامل‌ها سبب افزایش شدت فتوسنتز و رشد بیشتر برگ شد. مقایسهٔ میانگین‌های طول برگ برای سطوح P نشان داد که طول برگ با ۲۰درصد افزایش از ۳/۷ cm در تیمار شاهد به ۴/۴۳ cm در تیمار مصرف ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک رسید (جدول۳). همان‌طور که اشاره شد P نقش‌های اساسی در متابولیسم گیاه داشت و کمبود آن سبب اختلال در رشد عادی گیاه شد و طول برگ را کاهش داد. افزایش طول برگ بر اثر مصرف P با نتایج پژوهش‌های McArthur & Knowles(1993) مطابقت داشت.

وزن خشک بخش هوایی: اثرهای اصلی رطوبت خاک، Zn و P و اثر متقابل سه‌جانبهٔ آن‌ها بر وزن خشک بخش هوایی معنادار شد ولی اثرهای متقابل دوجانبهٔ آن‌ها بر وزن خشک بخش هوایی غیرمعنادار بود (جدول۲). مقایسهٔ میانگین‌های اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که بیشترین میزان وزن خشک بخش هوایی (۱۸/۳۹ g/pot) از تیمار آبیاری کامل و کمترین میزان آن (۱۶/۲۹ g/pot) از تیمار ۰/۵FC تا ۰/۶FC به دست آمد که بیانگر کاهش ۱۳درصدی وزن خشک بخش هوایی بر اثر تنش شدید رطوبتی بود (جدول۳). احتمالاً به‌علت تحت‌تأثیر قرارگرفتن فتوسنتز (Westigate and Grant, 1989; Shilpi and Tuteja, 2005; Germ *et al.*, 2007) ، بسته‌شدن روزنه‌ها (Westigate and Grant, 1989; Samarah and Mullen, 2006) و کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق، گیاه وزن خشک بخش هوایی را برای مقابله با تنش کمبود آب کاهش داده باشد. همچنین ممکن است فراهمی و انتقال عناصر غذایی به اندام‌های هوایی گیاه بر اثر تنش کمبود آب کاهش یافته (Yasin-Ashraf *et al.*, 1998; Shilpi and Tuteja, 2005) و مادهٔ خشک کم شده و کاهش ویژگی‌هایی مانند طول ساقه و برگ بر اثر تنش خشکی مؤید این مطلب است. با افزایش سطح Zn مصرفی وزن خشک بخش هوایی افزایش یافت ولی این افزایش فقط در سطح سوم Zn (مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn بر کیلوگرم خاک) معنادار شد (جدول۳). Zn یکی از عناصر ضروری مورد نیاز گیاه است که در فعال‌سازی بیش از ۷۰ آنزیم نقش دارد و تنها عنصری است که در ساختار هر ۶ گروه آنزیمی نقش دارد. این عنصر در تولید نشاسته و کربوهیدرات نقش دارد، زیرا بر اثر کمبود Zn شدت فتوسنتز کاهش می‌یابد و کلروپلاست غیرطبیعی می‌شود (Alloway, 2008). این نقش‌ها سبب شد که با مصرف Zn رشد گیاه افزایش پیدا کند. Zn سبب افزایش هدایت روزنه‌ای، شاخص کلروفیل و طول ساقه و برگ و درنهایت وزن خشک بخش هوایی شد. مقایسهٔ میانگین‌های وزن خشک بخش هوایی برای سطوح P نشان داد که بیشترین وزن خشک بخش هوایی (۲۰/۵۳ g/pot) از تیمار مصرف ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و کمترین آن (۱۳/۶۱ g/pot) از تیمار عدم مصرف P به دست آمد (افزایش ۵۱درصدی بر اثر مصرف P) (جدول۳) که با مشاهدات گلخانه‌ای کاملاً مطابقت داشت چراکه گلدان‌های با مصرف P بالا از رشد و توسعهٔ مناسب برخوردار بوده و اختلاف آن‌ها با تیمار شاهد با دید چشمی مشهود بود. مصرف P موجب انتقال مناسب انرژی و افزایش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، طول ساقه و برگ و درنهایت وزن خشک بخش هوایی شد. تأثیر مثبت P بر وزن خشک بخش هوایی با نتایج پژوهش‌های Maier *et al.* (2002) مطابقت داشت.

مقایسهٔ میانگین‌های وزن خشک بخش هوایی برای ترکیب‌های تیماری Zn و P و رطوبت خاک نشان داد که بیشترین وزن خشک بخش هوایی (۲۴/۰۱ g/pot) از تیمار آبیاری کامل و مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۳۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و کمترین آن (۹/۵۱ g/pot) از تیمار تنش شدید رطوبت خاک و عدم مصرف Zn و P به دست آمد (جدول۴). این موضوع بیانگر افزایش بیش از ۱۵۰درصدی مادهٔ خشک بخش هوایی بر اثر مصرف Zn، P و آبیاری مناسب بود. نتایج نشان داد

که بیشترین مادهٔ خشک بخش هوایی در شرایط آبیاری کامل از مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۳۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک به دست آمد، ولی با اعمال تنش آبیاری، برای نیل به حداکثر مادهٔ خشک نیاز بود سطح مصرف P تا ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک افزایش یابد که بیانگر افزایش نیاز گیاه به P در شرایط تنش کمبود آب به‌علت تثبیت بیشتر آن در خاک در شرایط کمبود آب(Havlin *et al*, 1999) و افزایش نیاز داخلی سیب‌زمینی بود. در شرایط مصرف P بالا (۶۰ میلی‌گرم) با افزایش مصرف Zn تا ۲۰ میلی‌گرم در شرایط تنش متوسط، مادهٔ خشکی معادل ۱۰ میلی‌گرم Zn در شرایط آبیاری کامل به دست آمد که نشانگر تأثیر مثبت Zn بر مادهٔ خشک گیاه در شرایط تنش رطوبتی بود، چراکه Zn نقش بارزی در روابط آبی گیاه، هدایت روزنه‌ای و افزایش رشد گیاه دارد. البته این نتیجه زمانی اتفاق افتاد که P عامل محدودکننده نبود، زیرا در سطح صفر P این نتیجه به دست نیامد بلکه اثر مثبت Zn در کنترل اثرهای کمبود آب با مصرف P مشاهده شد که نشانگر اهمیت P در تنش کمبود آب است.

جدول۴. مقایسهٔ میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ سیب‌زمینی برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک، Zn و P

رطوبت خاک	Zn (mg/kg)	P (mg/kg)	شاخص کلروفیل	هدایت روزنه‌ای cm/s	وزن خشک بخش هوایی (g/ pot)	مقدار نسبی آب برگ (درصد)
۰/۹FC -FC	۰	۰	۲۲/۸۴jk	۰/۴۸f-k	۱۱/۲۷jk	۸۶/۸۲abc
		۳۰	۲۴/۰۴ijk	۰/۷۳c-f	۱۶/۹۸e-i	۸۶/۸۸bc
		۶۰	۲۲/۷۹jk	۱/۰۱b	۲۲/۱۴a-d	۸۴/۴۵b-e
	۱۰	۰	۲۷/۷۰g-k	۰/۷۵cde	۱۵/۸۴f-j	۹۲/۵۴a
		۳۰	۲۳/۸۷ijk	۰/۹۲bcd	۱۵/۶۴g-j	۸۶/۹۰bc
		۶۰	۲۱/۴۰k	۰/۹۵bc	۲۱/۷۹a-e	۸۶/۶۲bc
	۲۰	۰	۳۱/۴۸e-h	۰/۷۳c-f	۱۵/۵۷g-j	۸۹/۵۱ab
		۳۰	۲۵/۴۶h-k	۱/۳۰a	۲۴/۰۱a	۸۵/۹۶b-e
		۶۰	۲۳/۶۲ijk	۰/۹۵bc	۲۲/۳۲abc	۸۷/۱۸bc
۰/۷FC -۰/۸FC	۰	۰	۲۶/۹۷g-k	۰/۶۳e-i	۱۲/۶۹ijk	۸۲/۸۱cde
		۳۰	۲۶/۷۰g-k	۰/۶۲e-i	۱۵/۹۸f-j	۸۴/۴۰b-e
		۶۰	۲۹/۲۵f-j	۰/۶۳e-i	۲۰/۶۱a-f	۸۵/۵۴b-e
	۱۰	۰	۲۵/۱۱h-k	۰/۶۷d-g	۱۱/۶۶jk	۸۳/۶۰b-e
		۳۰	۳۵/۱۸c-f	۰/۵۴e-j	۱۸/۳۳c-g	۸۵/۱۳b-e
		۶۰	۲۹/۸۲f-i	۰/۴۹e-k	۱۸/۹۱b-g	۸۶/۱۸bcd
	۲۰	۰	۳۱/۳۴e-h	۰/۶۵e-h	۱۸/۲۵c-g	۸۴/۱۰b-e
		۳۰	۲۹/۰۱f-j	۰/۹۴bc	۱۷/۳۷d-i	۸۵/۵۳b-e
		۶۰	۳۲/۵۱d-g	۰/۴۶g-k	۲۳/۲۷ab	۸۶/۵۹bc
۰/۵FC -۰/۶FC	۰	۰	۳۸/۴۶a-d	۰/۳۲jk	۹/۵۲k	۸۶/۵۸bc
		۳۰	۳۸/۸۳a-d	۰/۳۸ijk	۱۷/۱۶e-i	۸۰/۲۰de
		۶۰	۳۸/۲۸a-d	۰/۳۹h-k	۱۸/۵۹b-g	۸۴/۱۲b-e
	۱۰	۰	۳۷/۲۶b-e	۰/۳۶ijk	۱۳/۲۱h-k	۸۳/۸۹b-e
		۳۰	۳۹/۱۰abc	۰/۴۸ef-k	۱۷/۶۴c-h	۸۳/۳۳b-e
		۶۰	۴۳/۸۷a	۰/۲۷k	۱۷/۹۹c-h	۸۴/۴۴b-e
	۲۰	۰	۴۳/۷۲ab	۰/۲۴k	۱۴/۴۸-j	۸۵/۳۰b-e
		۳۰	۴۲/۳۰ab	۰/۲۸jk	۱۸/۶۳b-g	۸۱/۱۴cde
		۶۰	۳۸/۹۹abc	۰/۳۷ijk	۱۹/۱۹b-g	۷۹/۸۷e

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنادار ندارند (P<۰/۰۵).

مقدار نسبی آب برگ: مقدار نسبی آب برگ یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی تنش واردشده بر گیاه است که در کنار ویژگی‌هایی مانند هدایت روزنه‌ای و پتانسیل آب برگ می‌تواند در ارزیابی شدت تنش واردشده بر گیاه مؤثر باشد. اثر اصلی

رطوبت خاک و اثر متقابل رطوبت خاک×P بر مقدار نسبی آب برگ معنادار بود (جدول۲). مقایسهٔ میانگین‌ها نشان داد که بیشترین مقدار نسبی آب برگ (۸۷/۴۳درصد) از تیمار ۰/۹FC تا FC و کمترین آن (۸۳/۲۱درصد) از تیمار تنش شدید کمبود آب به دست آمد (جدول۳) که نشانگر تأثیر تنش کمبود آب بر روابط آبی گیاه و کاهش مقدار نسبی آب برگ بود. نتایج نشان داد که تنش کمبود آب (متوسط تا شدید) موجب کاهش مقدار نسبی آب برگ شد ولی تفاوت بین سطوح تنش متوسط و تنش شدید غیرمعنادار بود. همان‌طور که مقایسهٔ میانگین‌های مقدار نسبی آب برگ برای ترکیب‌های تیماری رطوبت خاک و P نشان می‌دهد (شکل۶) بیشترین مقدار نسبی آب برگ از تیمار آبیاری کامل و عدم مصرف P به میزان ۸۹/۶۲درصد و کمترین آن از تیمار تنش شدید کمبود آب و مصرف ۳۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک و به میزان ۸۱/۵۶درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که در تیمار آبیاری کامل مصرف P موجب کاهش مقدار نسبی آب برگ و در تنش متوسط مصرف P سبب افزایش مقدار نسبی آب برگ شد. نتایج نشان داد که مصرف P توانایی کاهش اثر تنش کمبود آب بر مقدار نسبی آب برگ را در شرایط تنش متوسط کمبود آب دارا بود. وجود رطوبت بالاتر در خاک سبب مقدار نسبی آب برگ بالاتری شد چراکه وجود رطوبت در دسترس بیشتر سبب جذب بیشتر آب و در نتیجه مقدار نسبی آب برگ بیشتر شد. مصرف فسفر با توجه به افزایش هدایت روزنه‌ای و کاهش پتانسیل آب برگ (Motalebifard *et al.*, 2013) موجب افزایش از دست رفتن رطوبت و کاهش مقدار نسبی آب برگ شد و برای همین سطح صفر فسفر و سطح اول رطوبت خاک بیشترین مقدار نسبی آب برگ را داشتند.

نتیجه‌گیری کلی

درمجموع نتایج نشان داد که اثرهای اصلی Zn، P و رطوبت خاک بر اکثر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده معنادار شد. Zn و P سبب بهبود طول ساقه و برگ، هدایت روزنه‌ای، وزن خشک بخش هوایی و سرعت رشد ساقه و تنش کمبود آب بموجب کاهش ویژگی‌های مذکور شد. اثرهای متقابل دوجانبه Zn، P و رطوبت خاک از نظر هدایت روزنه‌ای ساقه عمدتاً سینرژیستی بود. Zn و P توانایی رفع اثر سوء کمبود آب بر رشد سیب‌زمینی و ویژگی‌های فیزیولوژیک مانند هدایت روزنه‌ای را داشتند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش کمبود آب نیاز به مصرف P افزایش یافت به‌طوری‌که برای رشد مطلوب سیب‌زمینی در خاک‌های مشابه خاک استفاده‌شده در این پژوهش، در شرایط آبیاری کامل مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۳۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک می‌تواند توصیه شود درحالی‌که در شرایط تنش کمبود آب مصرف ۲۰ میلی‌گرم Zn و ۶۰ میلی‌گرم P بر کیلوگرم خاک قابل توصیه است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز به‌دلیل حمایت مالی در اجرای طرح پژوهشی شمارهٔ ۲۷/۲۶۴۰/ص که این مقاله حاوی قسمتی از نتایج آن است، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

REFERENCES

Alloway, B.J. (2008) *Zinc in soils and crop nutrition* (2end ed.). IZA and IFA, France.

Berman, M. E. and Dejong, T. M. (1997). Crop load and water stress effects on daily stem growth in peach (*Prunus persica*). *Tree Physiology*, 17, 467-472.

Borzooei, A., Khazaie, H. R. and Shariari, F. (2006). The impact of post anthesis drought stress on physiologycal characteristics and antioxidant enzymes in different wheat cultivars. *Agricultural Science and Technology*, 20(5), 65-75.

Saeed, I. A. M. and El-Nadi, A. H. (1997). Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa. *Irrigation Science,* 17, 63-68.

Cakmak, I. (2000). Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species (a review). *New Phytologist*, 146, 185-205.

Colomb, B., Kiniry, J. R. and Debaeke, P. (2000). Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. *Agronomy Journal,* 92(3), 428-435.

Darvish-Balochi, M., Paknazhad, F. Kashani, A. Ardakani, M. R. and darvish-Balochi, M. (2010). Effect of Drought Stress and some Microelements on Fluorescence Chlorophyll Parameters, Chlorophyll Content, RWC, EC, and Grain Yield in Corn (SC704). *Iranian Journal of Crop Science*, 41(3), 541-533. (In Farsi)

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. *European Journal of Agronomy*, 14, 31-41.

Gee, G. W. and Bauder, J. W. C. (1986) *Methods of soil analysis, part1, physical and mineralogical methods* (2end ed.). American Society of Agronomy, USA.

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 and Biochemistry*, 45, 162-167.

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.

Hovlin, J. L., Beaton, J. D. Tisdale, S. L. and Nelson, W. L. (1999) *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management* (6th ed.). Prentice Hall, USA.

Ierna, A., and Mauromicale, G. (2005). Physiological and growth response to moderate water deficit of off-season potatoes in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 82, 193-209.

Jefferies, R. A. (1995) Physiology of crop response to drought. In: Haverkort, A.J. and D.K.L. MacKerron (Eds.), *Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting lrowth*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers

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.

Jones, J. (2001) *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press, LLC. USA.

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.

Kirkham, M. B. 2004. Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press publications, USA.

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.

Lemaga, B. and Caesar, K. (1990). Relationships between numbers of main stems and yield components of potato (*Solanum tuberosum* L. cv. Erntestolz) as influenced by different daylengths. *Potato Research*, 33(2), 257-267.

Maier, N. A., McLaughlin, M. J. Heap, M. Butt, M. and Smart, M. K. (2002). Effect of current-season application of calcitic lime and phosphorus fertilization on soil pH, potato growth, yield, dry matter content, and cadmium concentration. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33, 2145-2165.

Marschner, H. (1995) *Mineral nutrition of higher plants*. (2end ed). Academic Press, USA.

McArthur D. A. J. and Knowles, N. R. (1993). Influence of species of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus nutrition on growth, development, and mineral nutrition of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Physiology,* 102, 771-782.

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.

Nelsen, C. E. and Safir, G. R. (1982). Increased drought tolerance of mycorrhizal onion plants caused by improved phosphorus nutrition. *Planta,* 154, 407-413.

Nielson, M., Iritani, W. M. and Weiler, L. D. (1989). Potato seed productivity: Factors influencing eye number per seed piece and subsequent performance. *American Journal of Potato Research, 66(3), 151-16*0.

Oroji, H., Golchin, A. (2012). The effect of zinc, manganese and copper on potato yield and tuber concentration of phosphorus and iron. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural resources*. 16, 221-230.

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.

Radin, J. W. (1984). Stomatal Responses to Water Stress and to Abscisic Acid in Phosphorus-Deficient Cotton Plants. *Plant Physiology*, 76(2), 392-394.

Rafiee, M., Nadian, H. A. Nour-Mohammadi, G. and Karimi, M. (2004). Effects of drought stress, phosphorous and zinc application on concentration and total nutrient uptake by corn (*Zea mays* L.). *Iranian, Journal of Agricultural Science*, 35(1), 1-12. (In Farsi)

Reddy A. R., Chaitanya, K. V. and Vivekanandan, M. (2004). Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161, 1189-1202.

Riahinia, S., Kocheki, A. R. and Nassiri- Mahallati, M. (2006). Canopy temperature in relation to plant water potential in four crop Species. *Agricultural Science and Technology Journal*, 20(7), 155-162. (In Farsi)

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.

Samarah, N. H., Mullen, R. E. Cianzio, S. R. and Scott, P. (2006). Dehydrin-like proteins in soybean seeds in response to drought stress during seed filling. *Crop Science*, 46, 2141–2150.

Sekiya, N. and Yano, K. (2008). Stomatal density of cowpea correlates with carbon isotope discrimination in different phosphorus, water and CO2 environments. *New Phytologist*, 179(3), 799-807.

Sharma, C. P., Mehrotra, S. C. Sharma, P. N. and Bisht, S. S. (1984). Water stress induced by zinc deficiency in cabbage. *Current Science*, 53, 44-45.

Sharma, P. N., Tripathi, A. and Bisht, S. S. (1995). Zinc requirement for stomatal opening in cauliflower. *Plant Physiology*, 107, 751-756.

Shilpi, M. and Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 444, 139-158.

Sparks, D. L., Page, A. L. Helmke, P. A. Loeppert, R. H. Soltanpour, P. N. Tabatabaei, M. A. Johnson, C. T. Sumner, M. E. (1996) *Methods of soil analysis. Part 3, chemical methods*. Soil Science Society of American Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.

Tavallali, V., Rahemi, M. Maftoun, M. Panahi, B. Karimi, S. Ramezanian, A. Vaezpour, M. (2009). Zinc influence and salt stress on photosynthesis, water relations, and carbonic anhydrase activity in pistachio. *Scientia Horticulturae*, 123, 272-279.

Trehan, S. P. and Sharma, R. C. (2003). Root–shoot ratio as indicator of zinc uptake efficiency of different potato cultivars. *Communication of Soil Science and Plant Analysis*, 34(7&8), 919-932.

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.

Weisz, R., Kaminski, J. and Smilowitz, Z. (1994). Water deficit effects on potato leaf growth and transpiration: Utilizing fraction extractable soil water for comparison with other crops. *American Journal of Potato Research*, 71(12), 829-840.

Westigate, M. E. and Grant, D. T. (1989). Effect of water deficits on seed development in soybean. I tissue water status. *Plant Physiology*, 91, 975-979.

Yasin-Ashraf, M., Ala, S. A. and Batti, A. (1998). Nutritional imbalance in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes grown at soil water stress. *Acta Physiolologiae Plantarum,* 20, 307-310.

Yuncai H. and Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science,* 168, 541-549.

Zhang J. and Davies, W.J. (1989). Abscisic acid produced in dehydrating roots may enable the plant to measure the water status of the soil. *Plant, Cell, and Environment*, 12, 73-810.