اثرات کاربرد روی بر رشد، جذب عناصر غذایی و سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانتی گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum esculentum* L.) تحت تنش شوری

مهری عسگری*، فریبا امینی و فاطمه جمالی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۱۶)

چکیده

در این مطالعه اثرات کاربرد روی و شوری بر پارامترهای رشد، جذب مواد غذایی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان گوجه‌فرنگی در یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، ارزیابی شد. فاکتورها شامل چهار سطح شوری (۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار کلریدسدیم) و سه سطح سولفات‌روی (۰، ۵ و ۱۰ میکرومولار) بودند. نتایج نشان داد که شوری وزن تر و خشک گیاه، مقدار روی و پتاسیم را کاهش می‌دهد، در حالی‌که با افزایش سطوح کلریدسدیم، مقدار سدیم و فعالیت آنتی‌اکسیدانی افزایش پیدا کرد. هم‌چنین نتایج نشان داد که سولفات‌روی بر پارامترهای رشد، غلظت روی و پتاسیم و فعالیت آنتی‌اکسیدانی اثر مثبت داشته اما غلظت سدیم و فسفر را کاهش داد. کاربرد سولفات‌روی مخصوصاً غلظت ۱۰ میکرومولار در گیاهان گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری، شاخص‌های رشد، غلظت پتاسیم، درصد بازدارندگی رادیکال ۱،۱-دی‌فنیل-۲-پیکریل‌هیدرازیل، فعالیت کاتالاز و سوپراکسیددیسموتاز را افزایش و غلظت سدیم و فسفر را کاهش داد. بیشترین مقدار وزن تر و خشک گیاه و جذب پتاسیم در گیاهان بدون تنش شوری همراه با غلظت ۱۰ میکرومولار سولفات‌روی و کمترین مقدار این شاخص‌ها در گیاهان تحت تنش شوری ۱۲۰ میلی‌مولار کلریدسدیم و بدون سولفات‌روی اندازه‌گیری شد. بنابراین روی می‌تواند کارایی و محصول گیاهان گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری را بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم، سدیم، سوپراکسیددیسموتاز، فسفر، کاتالاز

۱. گروه فیزیولوژی گیاهی، گروه زیست، دانشکده علوم، دانشگاه اراک

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m-askary@araku.ac.ir

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum esculentum* L.) از محصولات مهم زراعی متعلق به خانواده *Solanaceae* می‌باشد (۸) که دارای مقدار قابل‌توجهی لیکوپن، از مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های کاروتنوئیدی، است (۱۹). وابسته به واریته، ۶۵-۹۸٪ وزنی کل کارتنوئیدهای موجود در گوجه‌فرنگی را لیکوپن به خود اختصاص می‌دهد. گوجه‌فرنگی منبع مهمی از کاروتنوئیدها، فنولیک‌ها و اسیدهای آلی می‌باشد و مصرف آن در کاهش بیماری‌های قلبی عروقی، سرطان‌های پروستات و روده و حفظ تعادل اسید و قلیا بدن مؤثر است (۳۰).

در بین تنش‌های محیطی خسارت تنش‌های کمبود آب و شوری به گیاهان زراعی در سطح جهان در مقایسه با سایر تنش‌ها گسترده‌تر می‌باشد (۲۷). تحت تنش شوری، همه فرآیندهای مهم گیاه مثل فتوسنتز، ساخت پروتئین، تولید انرژی و متابولیسم چربی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۳۴). افزایش نمک از طریق کمبود آب و فشار اسمزی ایجاد شده توسط شوری و به‌وسیله اثر سمیت نمک یا زیاد بودن یون Na^+ و Cl^-، از رشد گیاه جلوگیری می‌کند (۲۹). شوری می‌تواند بر آزادسازی عناصرغذایی از فاز جامد به محلول خاک، عرضه عناصرغذایی به سطح ریشه و انتقال عناصرغذایی از ریشه به اندام‌های گیاهی تأثیر منفی داشته باشد. در خاک‌های شور حلالیت عناصری مثل روی، بور، سلینیوم، پتاسیم، فسفر و نیتروژن تغییر می‌کند که منجر به عدم تعادل عناصر غذایی و کاهش عملکرد گیاه می‌شود (۷). عدم تعادل تغذیه‌ای سبب بی‌نظمی‌های غشایی، بازدارندگی فتوسنتزی، تجمع متابولیت‌های سمی و تولید گونه‌های اکسیژن فعال(ROS (Reactive Oxygen Species می‌شود و تعادل بین تولید ROS و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها به هم می‌خورد که نتیجه آن آسیب اکسیداتیو است (۳۴).

تغذیه مناسب می‌تواند تا حدی به گیاه در تحمل و کاهش آسیب‌های تنش شوری کمک کند (۳۱). روی باعث حفظ تمامیت غشا از طریق اتصال به گروه‌های سولفیدریل می‌شود و فسفولیپیدها و پروتئین را از اکسیداسیون تیول و تشکیل دی‌سولفید محافظت می‌کند، سبب ثبات آنزیم‌ها، پروتئین‌های غشاء و ساختار لیپیدی غشا شده و به این ترتیب باعث کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و افزایش کارایی گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود و به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدانت عمل کند (۳۱ و ۳۴). روی به‌طور غیرمستقیم برای فعالیت آنزیم‌های درگیر در سم‌زدایی H_2O_2 مانند کاتالاز، آسکوربات‌پراکسیداز و گلوتاتیون‌ردوکتاز مورد نیاز است (۳) و در افزایش سطح جذب به‌واسطهٔ طویل شدن ریشه و هم‌چنین تسهیل انتقال آب و عناصر غذایی در گیاه به‌دلیل افزایش قطر و تعداد آوندها نقش دارد (۱۷). با توجه به نقش روی در حفظ تمامیت غشا و نفوذپذیری غشا، تعادل یون‌ها که در تنش شوری به‌هم خورده، در حضور روی برقرار می‌شود (۱۳). کاربرد روی اثر نامطلوب شوری را با مهار جذب سدیم و کلر و ایجاد تعادل تغذیه‌ای کاهش و نسبت K / Na را که شاخص تحمل بالا به تنش شوری است افزایش می‌دهد (۲).

در خاک‌های شور همراه با افزایش PH، حلالیت میکرونوترینت‌هایی مثل آهن، مس، منگنز، مولیبدن و روی کاهش می‌یابد و گیاهان رشد یافته در این خاک‌ها اغلب کمبود این عناصر را نشان می‌دهند (۲۴) هم‌چنین رشد میکروارگانیزم‌های خاک مثل قارچ‌های میکوریزی نیز می‌تواند محدود و مهار شود، بنابراین جذب آب و مواد معدنی از قبیل آهن، فسفر و روی هم بدین طریق هم محدود و مهار می‌شود (۱۶). در این خاک‌ها جذب مقادیر زیاد یون‌های سدیم و کلر رخ می‌دهد که به‌علت رقابت سبب اختلال در جذب و انتقال یون‌های ضروری و عدم تعادل یونی و کمبود عناصر ضروری گیاه مثل روی می‌شود (۲۵و ۳۴). با توجه به گسترش زمین‌های شور و کمبود عناصر مغذی این زمین‌ها از جمله روی، استفاده از ترکیباتی که بتواند رشد و تولید محصول را در شرایط شوری بهبود بخشد، ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف شوری و روی بر شاخص‌های رشد، تعادل تغذیه‌ای و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه گوجه‌فرنگی انجام شد.

جدول۱. نتایج تجزیه واریانس اثر شوری و سولفات‌روی بر شاخص‌های وزنی و درصد تخریب رادیکال DPPH (I%) گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	وزن برگ		وزن ساقه		وزن ریشه		I%
	تر	خشک	تر	خشک	تر	خشک	
تنش شوری	۲۵۴**	۳۷۳**	۲۳/۳**	۲۴/۶**	۲۷۹**	۲۲۷**	۳/۳**
کاربرد سولفات‌روی	۲۸/۱**	۴۰/۶**	۴/۰۴*	۴/۸۱*	۷۳/۴**	۵۲/۷**	۱۷۹**
اثر متقابل تنش شوری و سولفات‌روی	۲/۷۱*	۳/۱۲*	ns۰/۱۱	ns۰/۲۰	۲/۵۲*	۳/۰۹*	۱۳/۸**

ns: معنی‌دار نیست *: معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ **: معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

مواد و روش‌ها

کاشت بذر و اعمال تنش

پس از ضدعفونی بذر گوجه‌فرنگی *Lycopersicon esculentum* توسط اتانول ۷۰٪ (دو دقیقه) و هیپوکلریت سدیم ۱٪ (پنج دقیقه) و شستشو با آب مقطر (۳۳) و پس از جوانه‌زنی بذرها در پتری‌دیش، گیاهچه‌های ۳ روزه به ۳۶ گلدان حاوی پرلیت و خاک زراعی به نسبت ۱:۱ (وزنی/وزنی) انتقال یافتند. بافت خاک لومی رسی با pH=۷/۶، هدایت الکتریکی $۰/۸۹ dS\ m^{-1}$ و pH=۷/۹، میزان روی $۰/۵۲ mg\ kg^{-1}$، میزان فسفر $۹\ mg\ kg^{-1}$، میزان پتاسیم $۲۰۰\ mg\ kg^{-1}$، با ۰/۰۳ درصد نیتروژن کل و ۰/۳۴ درصد کربن آلی بود. گیاهان تا ۴ هفته با محلول هوگلند کامل، هفته‌ای ۱۵۰ ml تغذیه شدند و در شرایط گلخانه‌ای (روز ۲۵°C و شب ۲۰°C، شرایط نوری ۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی) قرار گرفتند. گیاهان ۲۸ روزه به مدت ۵ هفته، یعنی روزهای ۲۸، ۳۵، ۴۲، ۴۹ و ۵۶ تحت تأثیر تنش (۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار کلریدسدیم) قرار گرفتند. یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول سطوح مختلف کلریدسدیم NaCl (۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار) و فاکتور دوم سطوح مختلف سولفات‌روی $ZnSO_4, 7H_2O$ (۰، ۵ و ۱۰ میکرومولار) بود. محلول‌های سدیم‌کلرید و سولفات‌روی به محلول هوگلند فاقد روی اضافه و هفته‌ای یک بار به خاک محتوی گیاه به میزان ۱۵۰ میلی‌لیتر داده شد. هوگلند فاقد کلریدسدیم و فاقد روی به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. برداشت نهایی روز ۶۳ انجام شد.

فاکتورهای مورد سنجش

شاخص‌های رشد شامل وزن تر و خشک ساقه، برگ و ریشه برای سه گیاه از هر تیمار اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سدیم و پتاسیم از روش وانگ و زائو(۳۲)، اندازه‌گیری فسفر به روش کوهلر و همکاران (۱۸)، میزان روی (Zn) به روش کلیک و همکاران (۵)، تعیین کمیت ترکیبات آنتی‌اکسیدان کل از آزمون درصد تخریب رادیکال آزاد ۱و۱دی‌فنیل- ۲پیکریل‌هیدرازیل (DPPH) توسط عصاره گیاه (I%) از روش آبه و همکاران (۱)، فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز از روش گیانوپولیتیس و ریس(۱۲)، فعالیت آنزیم کاتالاز از روش کک مک و مارچنر (۴) و فعالیت آنزیم گایاکول‌پراکسیداز نیز از روش پل و همکاران(۲۶)استفاده شد. جهت آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار SPSS16 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن و برای رسم نمودارها از برنامه Excell استفاده گردید.

نتایج

جداول (۱ و ۲) اثر معنی‌دار سطوح مختلف شوری را بر وزن تر و خشک برگ، ساقه و ریشه، مقدار سدیم، پتاسیم، روی، درصد تخریب رادیکال DPPH، فعالیت سوپراکسیددیسموتاز SOD، گایاکول‌پراکسیداز GPOX و کاتالاز CAT نشان می‌دهد ولی شوری بر مقدار فسفر برگ اثر معنی‌داری نداشت. مطابق جدول ۳، کل شاخص‌های وزنی با افزایش شوری نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری می‌یابند. کمترین میزان وزن تر برگ، ساقه و ریشه به‌ترتیب با ۵۵/۷۴٪، ۵۹/۲۸٪ و ۶۹/۲۴٪ کاهش و

جدول۲. نتایج تجزیه واریانس اثر شوری و سولفات‌روی بر مقدار عناصر، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	پتاسیم	فسفر	سدیم	روی	کاتالاز	گایاکول‌پراکسیداز	سوپراکسیددیسموتاز
تنش شوری	۱۳۴**	۲/۸ns	۲۷۷**	۷/۲**	۷۱۰**	۲۳/۸**	۳۱۸**
کاربرد سولفات‌روی	۲۶/۳**	۵/۷**	۱۶/۸**	۳/۴*	۴۴/۹ **	۲/۳ ns	۲۲/۱**
اثر متقابل تنش شوری و سولفات‌روی	۲/۵*	/۶ ns	۲/۵ *	۱/۱ ns	۲/۹ *	۰/۵ ns	۲/۵*

ns: معنی‌دار نیست. *: معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ **: معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر شوری بر شاخص‌های وزنی، میزان عناصر، و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها مطابق آزمون دانکن (سطح ۰/۰۵) است. داده‌ها میانگین ۳ تکرار± SE است. مقایسه برای هر ردیف جداگانه انجام شده است.

شاخص	غلظت‌های مختلف شوری (میلی‌مولار)			
	۰	۴۵	۹۰	۱۲۰
وزن تر برگ (g)	۹/۲a±۰/۱۴۲	۶/۲b±۰/۱۳۲	۴/۹c±۰/۱۲۰	۴/۱d±۰/۱۳۵
وزن خشک برگ (g)	۰/۹۳a ±۰/۰۱۵	۰/۶۱ b ±۰/۰۱۱	۰/۵۰c ±۰/۰۲۱	۰/۴۰d ±۰/۰۱۷
وزن ترساقه (g)	۳/۵۵a ±۰/۱۸	۲/۶۰ b ±۰/۲۸	۲/۳۲ b ±۰/۱۵	۱/۴۴c ±۰/۲۲
وزن خشک ساقه (g)	۰/۳۴a ±۰/۰۱۵	۰/۲۶b ±۰/۰۲۸	۰/۲۲ b ±۰/۰۱۸	۰/۱۴c ±۰/۰۱۹
وزن تر ریشه (g)	۲/۴۸a ±۰/۰۴۹	۱/۵۶ b ±۰/۰۴۴	۱/۲۰ c ±۰/۰۵۴	۰/۷۶d±۰/۰۳۴
وزن خشک ریشه (g)	۰/۲۴a ±/۰۲۱	۰/۱۵b ±/۰۱۵	۰/۱۱ c ±/۰۰۷	۰/۰۷d ±/۰۰۵
سدیم(mg/g DW)	۱۲/۲d ±۱/۳۵	۱۷/۵c ±۱/۲۵	۴۵b ±۱/۲۱	۵۵/۳a ±۱/۲۰
پتاسیم(mg/g DW)	۶۲/۲a ±۱/۳۱	۴۴/۸b ±۱/۲۹	۳۵/۴c±۱/۲۱	۳۰/۲d ±۱/۲۵
روی(ppm)	۳/۴۸a ±۰/۲۲۱	۲/۸۴b ±۰/۲۱۱	۲/۴۳b c ±/۲۱۹	۲/۱۸c ±/۲۲۵
درصد تخریب رادیکال DPPH (I%)	۱۰/۱d ±۰/۳۲	۲۰/۲c ±۰/۲۹	۳۰/۹b ±۰/۲۲	۳۹/۹a ±۰/۲۴
سوپراکسیددیسموتاز (unit mg^{-1} protein)	۱۲/۶d±۰/۷۵	۲۱/۷c ±۰/۶۵	۳۲/۲b ±۰/۶۰	۳۸/۹a ±۰/۵۵
گایاکول‌پراکسیداز (unit mg^{-1} protein)	۰/۰۲۰d ±۰/۰۰۱	۰/۰۳۲c ±۰/۰۰۴	۰/۰۴b ±۰/۰۰۲	۰/۰۴۷a ±۰/۰۰۵
کاتالاز (unit mg^{-1} protein)	۰/۱۵۸d±۰/۰۰۷	۰/۳۱۳c ±۰/۰۰۵	۰/۴۴۳b±۰/۰۰۶	۰/۵۴۳a ±۰/۰۰۶

کمترین مقدار وزن خشک برگ، ساقه و ریشه به‌ترتیب با ۵۶/۴۸٪، ۵۶/۹۷٪ و ۶۹/۰۷٪ کاهش نسبت به شاهد در شوری ۱۲۰ میلی‌مولار مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار سدیم در شوری ۱۲۰ میلی‌مولار با ۳۵۲٪ افزایش نسبت به شاهد حاصل شد.

مقدار سدیم در تیمار ۹۰ و ۴۵ میلی‌مولار شوری به‌ترتیب ۲۶۸٪ و ۴۳/۶۱٪ افزایش را نسبت به شاهد نشان می‌دهند. میزان پتاسیم و روی برگ با افزایش شوری کاهش می‌یابد. مقدار پتاسیم در تیمارهای ۱۲۰، ۹۰ و ۴۵ به‌ترتیب ۵۱/۴۳٪، ۴۳/۰۴٪ و ۲۷/۸۵٪ کاهش نسبت به شاهد و مقدار روی در تیمارهای ۱۲۰، ۹۰ و ۴۵ میلی‌مولار شوری به‌ترتیب ۳۷/۱۵٪، ۳۰/۱۴٪ و ۱۸/۳۹٪ کاهش را نسبت به شاهد نشان می‌دهند. درصد تخریب رادیکال DPPH (I%) با افزایش شوری افزایش می‌یابد. در غلظت‌های ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار شوری به‌ترتیب ۹۸/۸۵٪، ۲۰۳٪ و ۲۹۲٪ افزایش I% نسبت به شاهد مشاهده می‌شود. بیشترین فعالیت هر سه آنزیم SOD، GPOX و

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر سولفات روی بر شاخص‌های وزنی، میزان عناصر، و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها مطابق آزمون دانکن (سطح ۰/۰۵) است. داده‌ها میانگین ۳ تکرار± SE و مقایسه برای هر ردیف جداگانه انجام شده است.

شاخص	غلظت‌های مختلف سولفات‌روی (میکرومولار)		
	۰	۵	۱۰
وزن تر برگ(g)	۵/۴۴ c ±۰/۱۲۳	۶/۳۱ b±۰/۱۳۳	۶/۷۲ a±۰/۱۲۹
وزن خشک برگ(g)	۰/۵۴۴ c ±۰/۰۰۵	۰/۶۲۶ b ±۰/۰۱۹	۰/۶۷۳ a ±۰/۰۰۸
وزن ترساقه(g)	۲/۲۴ b ±۰/۱۴۶	۲/۳۷ b ±۰/۱۵۶	۲/۸۳ a ±۰/۱۵۱
وزن خشک ساقه(g)	۰/۲۲۵ b ±۰/۰۱۰	۰/۲۳۱ b ±۰/۰۱۵	۰/۲۸۲ a ±۰/۰۱۳
وزن تر ریشه(g)	۱/۱۵ c ±۰/۰۳۵	۱/۵۶ b ±۰/۰۳۸	۱/۷۹ a ±۰/۰۳۸۲
وزن خشک ریشه(g)	۰/۱۱۸ c ±۰/۰۰۳	۰/۱۵۱ b ±۰/۰۰۴	۰/۱۸۰ a ±۰/۰۰۷
سدیم(mg/g DW)	۳۷/۱۶ a ±۱/۰۹	۳۲/۱۶ b ±۱/۰۸	۲۸/۲۵ c ±۱/۱۸
پتاسیم(mg/g DW)	۳۷/۵۸ c ±۱/۰۷	۴۳/۶۶ b ±۱/۰۵	۴۸/۳۳ a ±۱/۱۵
فسفر(mg/g DW)	۰/۱۱۳ a ±۰/۰۰۷	۰/۱۰۱ ab±۰/۰۰۶	۰/۰۸۵ b ±۰/۰۰۹
روی(ppm)	۲/۴۵ a ±۰/۱۸۵	۲/۶۹ ab ±۰/۱۸۲	۳/۱۰ b ±۰/۱۸۹
درصد تخریب رادیکال DPPH (I%)	۲۲/۷۶ c ±۰/۱۹۸	۲۵/۳۷ b ±۰/۱۹۲	۲۷/۹۱ a ±۰/۱۸۲
سوپراکسیددیسموتاز (unit mg^{-1} protein)	۲۳/۶۹ c ±۰/۵۶۳	۲۶/۴۸ b ±۰/۵۷۷	۲۸/۹۷ a ±۰/۵۸۳
کاتالاز (unit mg^{-1} protein)	۰/۳۲۷ c ±۰/۰۰۴	۰/۳۶۸ b ±۰/۰۰۵	۰/۳۹۹ a ±۰/۰۰۷

CAT در شوری ۱۲۰ میلی‌مولار دیده می‌شود. در سطوح ۴۵، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌مولار شوری افزایش فعالیت SOD به‌ترتیب ۷۱/۹۲٪، ۱۵۴٪ و ۲۰۸٪، افزایش فعالیت کاتالاز به‌ترتیب ۹۸/۱٪، ۱۸۰/۳۷٪ و ۲۴۳٪ و افزایش فعالیت گایاکول‌پراکسیداز به‌ترتیب ۶۰٪ ، ۱۰۰٪ و ۱۳۵٪ نسبت به شاهد می‌باشد (جدول۳).

تیمار روی بر تمام شاخص‌های مورد سنجش به استثنای فعالیت GPOX اثر معنی‌داری گذاشته است (جدول ۱ و۲). در گیاهان تحت تیمار۱۰ میکرومولار روی، بیشترین شاخص‌های وزنی، مقدار پتاسیم و فسفر دیده می‌شود. افزایش وزن تر برگ، ساقه و ریشه در غلظت ۱۰ میکرومولار به‌ترتیب ۲۳/۵۶٪، ۲۶/۶۳٪ و ۵۵/۵٪ و برای وزن خشک همین اندام‌ها به‌ترتیب ۲۳/۷۱٪، ۲۵/۳۳٪ و ۵۲/۵۴٪ است. کمترین میزان سدیم و فسفر در ۱۰ میکرومولار روی به‌ترتیب با ۲۳/۹۷٪ و ۲۴/۷۷ ٪ کاهش و بیشترین میزان پتاسیم و روی در همین تیمار به‌ترتیب با ۲۸/۵۹٪ و ۲۶/۸۵٪ افزایش نسبت به شاهد اندازه‌گیری شد. افزایش میزان I% در غلظت‌های ۵ و ۱۰ میکرومولار به‌ترتیب ۱۱/۴۶٪ و ۲۲/۶۲٪ نسبت به شاهد می‌باشد. بیشترین فعالیت SOD و CAT در ۱۰ میکرومولار روی با ۲۲/۲۸٪ و ۲۲/۰۱٪ افزایش نسبت به شاهد دیده می‌شود(جدول۴).

اثر متقابل شوری و روی بر وزن تر و خشک برگ و ریشه، مقدار سدیم و پتاسیم، درصد تخریب رادیکال DPPH و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسیددیسموتاز معنی‌دار بود (جدول ۱ و ۲). کاهش ۵۷/۱۲ درصدی وزن تر برگ تحت تنش شوری ۱۲۰ میلی‌مولار در حضور ۵ و ۱۰ میکرومولار روی به‌ترتیب به ۵۰/۰۲ و ۳۹/۹۸ درصد تغییر یافت. در همین سطح شوری، کاهش ۵۸/۲۴٪ وزن خشک برگ نسبت به شاهد در حضور ۱۰ میکرومولار روی به ۴۲/۱۳٪ کاهش رسید. افزودن ۱۰ میکرومولار روی باعث شده تا میزان کاهش وزن تر در شوری

جدول۵. مقایسه میانگین اثرمتقابل شوری و سولفات‌روی بر شاخص‌های وزنی گوجه‌فرنگی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها مطابق آزمون دانکن (سطح ۰/۰۵) است. داده‌ها میانگین ۳ تکرار± SE است. مقایسه برای هر ردیف جداگانه انجام شده است.

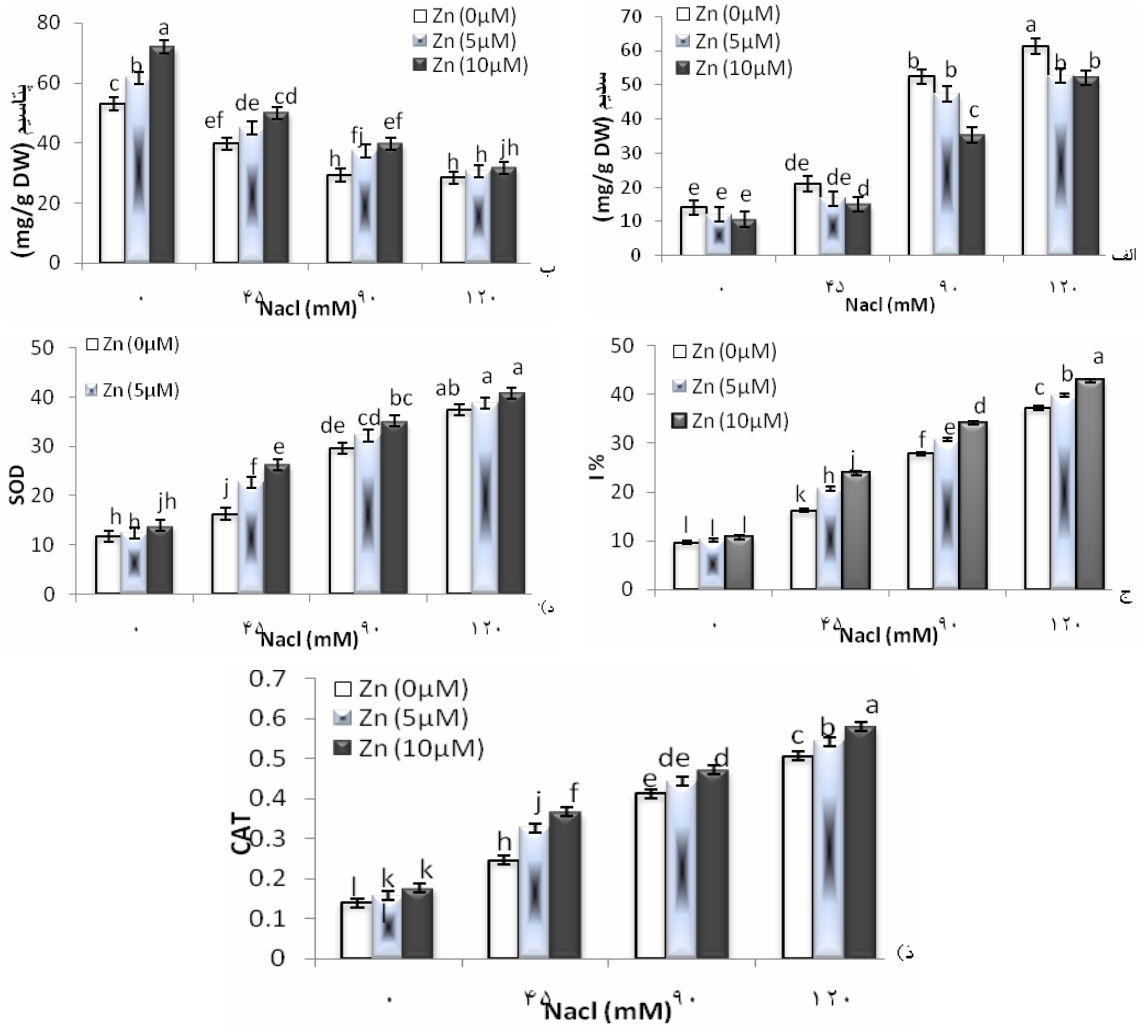
شوری	سولفات روی	وزن خشک برگ	وزن تر برگ	وزن خشک ریشه	وزن تر ریشه
	۰	۰/۸۰۷ c ±۰/۰۲۱	۸/۰۷ b ±۰/۲۴۶	۰/۲۰۳c± ۰/۰۰۸	۱/۹۸۷b±۰/۰۷
۰	۵	۰/۹۶۳ b ±۰/۰۲۳	۹/۸ a ±۰/۲۳۳	۰/۲۴۷b±۰/۰۰۷	۲/۶۴۷a±۰/۰۸
	۱۰	۱/۰۳a±۰/۰۳۱	۱۰/۰۱۷ a ±۰/۲۴۰	۰/۲۹۷ a ±۰/۰۸	۲/۸۱ a ±۰/۰۹
	۰	۰/۵۵۷ e±۰/۰۳۰	۵/۴۳۳ d ±۰/۲۴۱	۰/۱۱۷ ef ±۰/۰۴۸	۱/۱۳۳ d ±۰/۰۷۶
۴۵	۵	۰/۶۲۳ d ±۰/۰۲۸	۶/۵۶۷ c ±۰/۲۲۶	۰/۱۶۳d±۰/۰۲۸	۱/۶۳۳c ±۰/۰۷
	۱۰	۰/۶۵۷ d ±۰/۰۲۳	۶/۸c ±۰/۲۵۶	۰/۱۹۳c±۰/۰۷۸	۱/۹۱۷ b ±۰/۰۹
	۰	۰/۴۷۷f±۰/۰۱۹	۴/۸ d ±۰/۲۳۹	۰/۰۹۷ fj ±۰/۰۸۸	۰/۹۹۷ de ±۰/۰۷۶
۹۰	۵	۰/۵۰۳ ef ±۰/۰۲۰	۴/۸۶۳ d ±۰ /۲۲۸	۰/۱۱ fj ±۰/۰۷۸	۱/۱۶۷ d ±۰/۰۸۶
	۱۰	۰/۵۴ e ±۰/۰۲۶	۵/۲۳ d ±۰/۲۳۴	۰/۱۴de±۰/۰۶۹	۱/۴۵۶ c±۰/۰۹
	۰	۰/۳۳۷h±۰/۰۱۷	۳/۴۶ e ±۰/۲۴۱	۰/۰۵۷h ±۰/۰۰۹	۰/۴۹۷ f ±۰/۰۷۸
۱۲۰	۵	۰/۴۱۳j±۰/۰۱۸	۴/۰۳۳ e ± ۰/۲۳۶	۰/۰۸۳ j ±۰/۰۷۸	۰/۸۰۳e±۰/۰۸۲
	۱۰	۰/۴۶۷fj±۰/۰۲۱	۴/۸۴۳ d ±۰/۲۲۹	۰/۰۹ fj ±۰/۰۶۹	۰/۹۹de±۰/۰۸۱

۱۲۰ و ۹۰ میلی‌مولار مشابه شوری ۴۵ میلی‌مولار بدون دریافت روی باشد. کاهش ۶۹/۲۴ ٪ وزن تر و ۶۹/۰۷٪ وزن خشک ریشه در شوری ۱۲۰ میلی‌مولار در حضور ۱۰ میکرومولار روی به ۵۰/۱۷٪ و ۵۵/۶۶ تغییر کرد. در سایر سطوح شوری نیز اثر مثبت تعدیل‌کننده روی در افزایش وزن تر و خشک برگ و ریشه دیده می‌شود. وزن تر و خشک ریشه در شوری ۴۵ میلی‌مولار در حضور ۱۰ میکرومولار روی مشابه شاهد است یعنی غلظت ۱۰ میکرومولار روی توانسته است اثر شوری ۴۵ میلی‌مولار را خنثی سازد (جدول ۵).

در تمام غلظت‌های شوری با افزودن روی از میزان سدیم کاسته و مقدار پتاسیم افزوده می‌شود. میزان کاهش پتاسیم در شوری ۱۲۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد ۴۶/۵۴٪ است که در غلظت ۵ و ۱۰ میکرومولار روی به‌ترتیب به ۴۲/۱۵٪ و ۴۰/۲۶٪ رسیده است. در تمام غلظت‌های شوری با افزایش روی مقدار I%، فعالیت SOD و CAT افزایش می‌یابد. کمترین و بیشترین مقدار I% به‌ترتیب در گیاهان شاهد و تحت تیمار ۱۲۰mM NaCl + ۱۰μM $ZnSO_4$ (با ۳۴۴/۰۴٪ افزایش نسبت به شاهد) مشاهده می‌شود. کمترین و بیشترین مقدار فعالیت SOD نیز به‌ترتیب در شاهد و تحت تیمار ۱۲۰mM NaCl + ۱۰μM $ZnSO_4$ (با ۲۴۸/۶۲٪ افزایش نسبت به شاهد) اندازه‌گیری شد. کمترین و بیشترین مقدار فعالیت CAT نیز به‌ترتیب در گیاهان شاهد و تحت تیمار ۱۲۰mM NaCl + μM ۱۰$ZnSO_4$ (با ۳۱۴/۲۸٪ افزایش نسبت به شاهد) دیده می‌شود (شکل ۱).

بحث

در این مطالعه، با فزایش شوری شاخص‌های رشد کاهش یافت و با اضافه کردن روی میزان کاهش ناشی از شوری تا حدودی جبران شد. نتایج مشابه برای سویا (۳۴) و گوجه‌فرنگی(۸) گزارش شده است. عوامل مختلفی چون کاهش فتوسنتز، تخریب غشاهای سلولی، کاهش آب قابل استفاده گیاه و سمیت یون‌های سدیم از عوامل اصلی کاهش وزن تحت تنش شوری هستند (۲۸). به‌علت نقش روی در تولید اکسین و آثار مثبت آن بر تقسیم میتوز، فتوسنتز، افزایش شاخص‌های رشد در شرایط



شکل۱. اثر متقابل شوری و سولفات‌روی بر میزان سدیم (الف)، پتاسیم (ب)، درصد تخریب DPPH(I%)(ج)، فعالیت سوپراکسیددیسموتاز (SOD) (د) و کاتالاز CAT (ذ) گوجه‌فرنگی. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها مطابق آزمون دانکن (سطح ۰/۰۵) و خطوط نشان‌دهنده خطای استاندارد (SE) است.

شوری با افزودن روی ایجاد می‌شود (۳۴). در مطالعه حاضر تحت تنش شوری میزان سدیم و فسفر افزایش و پتاسیم کاهش یافتند. تحت تنش شوری، به‌دلیل کاهش بیان آنزیم ATPسنتاز، یکی از آنزیم‌های مهم در حفظ هموستازی یون در سلول گیاهی، تعادل یونی گیاه به‌هم می‌خورد و هم‌چنین با تجمع یون‌های مضر در سیتوپلاسم، در متابولیسم سایر عناصر مورد نیاز گیاه اختلال ایجاد می‌شود (۲۰). انباشت سدیم، جذب آب و عناصر Fe، K و Zn را مهار می‌کند (۲۷). آسیب غشایی می‌تواند دلیلی برای جذب اضافی Na و Cl و کاهش جذب پتاسیم باشد(۳ و ۱۵). یون سدیم با یون پتاسیم از طریق کوترانسپورترهای Na^+-K^+ رقابت می‌کند و باعث ایجاد سطوح سمی سدیم و غلظت‌های ناکافی پتاسیم برای واکنش‌های آنزیمی و تعادل اسموتیک می‌شود (۲۱). در این مطالعه با افزودن روی تحت تنش شوری جذب پتاسیم افزایش و جذب سدیم و فسفر کاهش یافت. نسبت بالا K /Na شاخص خوبی از تحمل بالا به تنش شوری است. روی باعث افزایش این نسبت و نهایتاً افزایش عملکرد گیاه در شرایط تنش شوری می‌شود (۲۱). به‌دلیل نقش روی در حفظ تمامیت ساختاری و عملکردی

غشاهای سلولی ریشه، ورود و خروج Na را در دو سوی غشای پلاسمایی کنترل می‌کند. ذخیرهٔ مناسب روی برای کنترل جذب سدیم در گیاهان مهم است (۳۱). روی مانع از جذب بیش از حد فسفر توسط ریشه‌ها و انتقال فسفر از ریشه به برگ می‌شود (۳۵).

در این مطالعه با افزایش سطوح شوری درصد تخریب رادیکال آزاد DPPH، فعالیت گایاکول‌پراکسیداز، سوپراکسیددیسموتاز و کاتالاز به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند. نتایج مشابه در پنبه (۶) و سویا (۳۴) گزارش شده است. تولید زیاد ROS در تنش شوری ناشی از آسیب به سیستم‌های انتقال الکترون کلروپلاست، میتوکندری و تنفس نوری است (۳۱). گیاهان در پاسخ به تنش شوری، جهت جلوگیری از هدر رفت آب، هدایت روزنه‌ای را کاهش می‌دهند، بنابراین غلظت CO_2 درونی کاهش می‌یابد و احیای CO_2 در چرخهٔ کالوین کم می‌شود (۹). تعادل بین تولید اکسیژن در فاز فتوشیمیایی و مصرف NADPH در چرخه کالوین از بین می‌رود و به دنبال آن جریان الکترون به O_2 و تشکیل رادیکال O_2^- افزایش می‌یابد (۱۱). هم‌چنین کاهش CO_2 درون برگ سبب افزایش فعالیت اکسیژنازی آنزیم روبیسکو و القای تنفس نوری به‌ویژه در گیاهان C_3 و منجر به تولید H_2O_2 بیشتر در پراکسی‌زوم می‌شود (۱۰). برای کنترل سطح ROS، گیاهان به سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی مثل سوپراکسیددیسموتاز SOD، کاتالاز CAT، گایاکول‌پراکسیداز GOPX مجهز می‌شوند (۲۲). آنتی‌اکسیدانت‌ها براساس ژنوتیپ گیاه، نوع نمک، غلظت نمک، مرحلهٔ رشد و شرایط محیطی تغییر می‌کنند (۲۱). همبستگی مثبت بین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و افزایش تنش شوری موجود است (۲). سوپراکسیددیسموتاز در تمام موجودات زنده هوازی و بخش‌های درون‌سلولی حساس به تنش اکسیداتیو وجود دارد و آنیون سوپراکسید را به هیدروژن‌پراکسید کاتالیز می‌کند(۶). کاتالاز، اصلی‌ترین آنزیم جاروبگر پراکسیدهیدروژن است که در تنش شوری در بسیاری ازگیاهان فعالیتش افزایش یافته است (۱۴).

هم‌چنین در این مطالعه مکمل روی به تنهایی و یا تحت تنش شوری درصد تخریب رادیکال DPPH و فعالیت آنتی‌اکسیدانتی سوپراکسیددیسموتاز و کاتالاز را بیشتر افزایش داد. این نتایج پیشنهاد می‌کند که آسیب غشایی القا شده به‌وسیله NaCl و تنش اکسیداتیو به طور کارآمدی بوسیله مکمل Zn کنترل می‌شود (۳۱). روی از طریق تغییر نفوذپذیری غشا و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو از آثار مخرب رادیکال‌های آزاد و مواد اکسیدکننده جلوگیری می‌کند و می‌تواند به‌عنوان تثبیت‌کننده و محافظ غشاهای حیاتی در برابر تنش اکسیداتیو و خسارت پراکسیداتیو عمل کند. روی با اثر بر جذب و غلظت سایر عناصر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳ و ۳۱). روی کوفاکتور فلزی در ساختمان Cu/Zn SOD–است بنابراین فعالیت آنزیم SOD را افزایش می‌دهد (۲۳). نقش روی در دفاع آنتی‌اکسیدانتی نه تنها به افزایش حذف این رادیکال‌ها از طریق شرکت در ساختمان آنزیم سوپراکسیددیسموتاز مربوط است، بلکه به کنترل تشکیل رادیکال‌های آزاد نیز برمی‌گردد(۳). روی باعث حفظ تمامیت غشا و محافظت از غشا در برابر آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش شوری با افزایش فعالیت سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. در شرایط کمبود روی فعالیت Cu/Zn سوپراکسید دیسموتاز کاهش می‌یابد چرا که روی به‌طور مستقیم در بیان ژن و سنتز پروتئین نقش دارند (۷).

نتیجه‌گیری

تیمار روی با حفظ تمامیت غشای سلول، کاهش جذب سدیم و افزایش پتاسیم و بهبود قدرت دفاع آنتی‌اکسیدانی، موجب کاهش آثار تنش اکسیداتیو ناشی از تنش شوری شد و با بهبود شاخص‌های رشدی، تحمل گوجه را نسبت به تنش شوری افزایش می‌دهد.

منابع مورد استفاده

1. Abe, N., T. Murata and A. Hirota. 1998. Novel 1,1-diphenyl-2-picryhy- drazyl- radical scavengers, bisorbicillin and demethyltrichodimerol, from a fungus. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 62: 61-662.
2. Bybordi, A., S. J. Tabatabaei and A. Ahmadev. 2010. Effect of salinity on fatty acid composition of Canola (*Brassica napus* L). *Journal of Food, Agricalture and Environment* 8(1): 113-115.
3. Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist* 146:185-205.
4. Cakmak, I. and H. Marschner. 1988. Zinc-dependent changes in ESR signals, NADPH oxidase and plasma membrane permeability in cotton roots. *Physiologia Plantarum* 73(1): 182-186.
5. Celik, A., A. Kartal, A. Akdoganand and Y. Kaska. 2004. Determining the heavy metal pollution in penizli (Turkey) by using *Robinio pseudo-acacia* L. *Journal of Environment International* 31: 105-112.
6. Desingh, R. and J.G. Kanagara. 2007. Influence of salinity stress on photosynthesis and antioxid active systems in two cotton varieties. Gen, Appl. *Plant Physiology* 33(3-4):221-234.
7. Ebrahimian, E. and A. Bybordi. 2011. Exogenous silicium and zinc increase antioxidant enzyme activity and alleviate salt stress in leaves of sunflower. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 9(1): 422- 427.
8. Ejaz, M., R. Waqas, M. Butt, S. U. Rehman and A. Manan. 2011. Role of macro-nutrients and micro-nutrients in enhancing the quality of tomato. *International Journal for Agronomy Veterinary and Medical Sciences* 5: 401–404.
9. Gaber, M. 2010. Antioxidative defense under salt stress. *Plant Signaling and Behavior* 5(4): 369-374.
10. Ghannoum, O. 2009. C_4 photosynthesis and water stress. *Annuals of Botany* 103: 635-44.
11. Gill, S.S. and N. T. Uteja. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 48: 909-930.
12. Giannopolitis, C.N. and S. K. Ries. 1977. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants. *Plant Physiology* 59: 309-314.
13. Gurmani, A.R., J.U. Din, S.U. Khan, R. Andaleep, K. Waseem, A. Khan and A. Hadyat-Ullah. 2012. Soil Application of zinc improves growth and yield of tomato. *International Journal Agricultural Biology* 14: 91–96.
14. Harinasut, P., D. Poonsopa, K. Roengmongkol and R. Charonsataprom. 2003. Salinity effects on antioxidant enzymes in Mulberry cultivar. *Science Asia* 29: 109-113.
15. Hejazi Mehrizi, M., H. Shariatmadari, A .H. Khoshgoftarmanesh and A. Zarezadeh. 2011. Effect of salinity and zinc on physiological and nutritional responses of rosemary. *International Agrophysics* 25: 349-353
16. Hojjat Nooghi, F. and V. Mozafari. 2012. Effects of calcium on eliminating the negative effects of salinity in pistachio (*Pistacia vera* L.) Seedlings. *Australian Journal of Crop Science* 6(4): 711-716.
17. Khoshgoftarmanesh, A. H., M. R. Balai and Z. Khademi. 2001. The effect of ZnSO4 on the growth and yield of wheat in saline-bara soils. *In*: 7th Iran. Soil Sci. Cong., Univ. of Shahrekord, Shahr-e-Kord, Iran, Sept. 14–21.
18. Kohler, J., F. Caravaca and A. Roldan. 2007. Interactions between a plant growth promoting rhizobacterium, an AM fungus and a phosphate-solublising fungus in the rhizosfere of *Lactuca sativa*. *Applied Soil Ecology* 35(3): 480-487.
19. Lavecchia, R. and A. Zuorro. 2008. Improved lycopene extraction from tomato peels using cell-wall degrading enzymes. *European Food Research and Technology* 228(1): 153-158.
20. Misra, N. and A. K. Gupta. 2006. Effect of salinity and different nitrogen sources on the activity of antioxidant enzymes and indole alkaloid content in catharantus roseus seedlings. *Journal Plant Physiology* 163(1):11-18.
21. Munns, R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* 167: 645–663.
22. Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology* 59: 651-681.
23. Najami, N., J. Tibor, W. Barriah, G. Kayam, T. Moshe, M. Guy and M. Volokita. 2008. Ascorbate peroxidase gene family in tomato: its identification and characterization, *Molecular Genetics and Genomics* 279(2): 171-182.
24. Page, A. L., A.C.Chang and D.C. Adriano. 1990. Deficiencies and toxicities of trace elements. Agricultural Salinity Assessment and Management, Chapter 7, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, ASCE, 138-160.
25. Parida, A. K. and A. B. Das. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60: 324-349.
26. Polle, A., T. Otter and F. Seifert. 1994. Apoplastic peroxidases and lignification in needles of norway spruce (*Picea Abies* L.). *Plant Physiology* 106: 53-56.
27. Said-Al Ahl, H. A. H and A. M. Abeer. 2010. Effect of zinc and / or iron foliar application on growth and essential oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress. *Ozean Journal of Applied Sciences* 3(1): 97-111.
28. Sharifi, M., M. Ghorbanli and H. Ebrahimzadeh. 2006. Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pre-treated mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Physiology* 164(9):1144-1151.

29. Sobhanian, H., R. Razavizadeh, Y. Nanjo, A. A. Ehsanpour, F. Rastgar Jazii, N. Motamed and S. Komatsu. 2010. Proteome Analysis of Soybean Leaves, Hypocotyls And Roots Under Salt Stress. *Proteome Science* 8:19-33. doi: 10.1186/1477-5956-8-19
30. Socaciu, C. 2008. Food Colorants Chemical and Functional Properties. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton. 652p.
31. Tavallali,V., M. Rahemi, S. Eshghi, B. Kholdbarin and A. Ramezanian. 2010. Zinc alleviates salt stress and increases antioxidant enzyme activity in the leaves of pistachio (*Pistacia vera* L. 'Badami') seedlings. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 34 349-359.
32. Wang, B. S. and K. F. Zhao. 1995. Comparison of extractive methods of Na+, K+ in wheat leave. *Plant physiology Communications* 3(1): 50–52.
33. Wang, Y. X. and H. Oyaizu. 2009. Evaluation of the phytoremediation potential of four plant species for dibenzofuran-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials* 168: 760-764.
34. Weisany, W., Y. Sohrabi, GH. Heidari, A. Siosemardeh and K. Ghassemi-Golezani. 2012. Changes in antioxidant enzymes activity and plant performance by salinity stress and zinc application in soybean (*Glycine max* L.). *Plant Omics Journal* 5(2):60-67.
35. Welch, R.M., M. J. Webb and J. F. Lonegaran. 1982. Zinc in membrane function and its role in phosphorus toxicity. PP. 710-715. *In*: Scaife, A. (Ed.), Proc. 9th Intl. Plant Nutr. Coll, Commonwealth Agricultural Bureau, Farnham Royal. Bucks., England.