اثر برهم‌کنش کادمیم و پتاسیم بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و غلظت عناصر غذایی در گوجه‌فرنگی

حنیفه سید حاجی زاده[1*]، مریم کامرانی آلیله[1]، فرهاد بهتاش[1] و سید بهمن موسوی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳)

چکیده

وجود کادمیم در خاک تهدید بزرگی برای رشد و باردهی گیاه است. گیاهان اغلب کادمیم را در بخش خوراکی خود تجمع می‌دهند که باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شود. بدین منظور آزمایشی بر پایه طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل در ۳ تکرار برای بررسی اثر غلظت‌های مختلف پتاسیم (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بر گوجه‌فرنگی تحت غلظت‌های مختلف تنش کادمیم (صفر، ۲ و ۴ میلی‌گرم در لیتر) و ارزیابی کارایی آن در کاهش آثار تنش انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم، میزان مالون دی‌آلدئید، میزان هیدروژن پراکسید و فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز افزایش یافت. برهم‌کنش کادمیم و پتاسیم بر غلظت آهن در میوه و غلظت روی در برگ و میوه گوجه فرنگی تأثیر معنی‌داری نداشت اما کاربرد هریک از آنها به تنهایی تأثیر معنی‌داری داشت به‌گونه‌ای که مصرف پتاسیم باعث افزایش غلظت آهن، روی و پتاسیم در میوه و کاهش مالون دی‌آلدئید و هیدروژن پراکساید شد. نتایج آزمایش‌های گلخانه‌ای نشان داد که با مصرف کود نیترات پتاسیم کارایی گیاه‌پالایی در کاهش تنش کادمیم بهبود یافت اگرچه تداوم پژوهش‌ها در شرایط مزرعه ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آنزیم آنتی‌اکسیداتیو، آهن، پروتئین، فلز سنگین، *Lycopersicon esculentum* Mill.

مقدمه

آلودگی محیط زیست به‌وسیله فلزات سنگین در اثر فعالیت‌های معدن کاری و صنعتی در قرن ۱۹ و ۲۰ افزایش یافته که سطح وسیعی از این آلودگی‌ها به‌وسیله عناصری مانند کادمیم، مس، جیوه و سرب است (۳۴). تجمع این مواد در خاک و گیاه تهدید جدی برای سلامتی انسان محسوب می‌شود چرا که احتمال ورود این عناصر به زنجیره غذایی وجود دارد (۴۶). کادمیم یکی از فلزات سنگین با تحرک زیاد در محیط زیست است (۴۱) که به آسانی توسط ریشه گیاهان جذب شده و به اندام‌های مختلف گیاهی منتقل شده (۵۰) و باعث اختلال در فتوسنتز و رشد گیاه (۳۹)، افزایش پراکسیداسیون لیپید و نیز مقدار مالون دی‌آلدهید و از طرفی کاهش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در برگ‌های لاین‌های حساس گندم می‌شود (۶). همچنین در این لاین‌ها، مقدار قند محلول کل کاهش یافته ولی اسیدهای آمینه آزاد افزایش می‌یابد و مقدار کادمیم کم‌تری در شاخساره خود جمع می‌کنند (۶).

۱. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ص. پ. ۵۵۱۳۶-۵۵۳
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ص. پ. ۵۵۱۳۶-۵۵۳
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hajizade@maragheh.ac.ir

پتاسیم یکی از عناصر غذایی مهم است که به‌صورت یون متحرک در گیاه وجود دارد و اغلب ماهیت کاتالیزوری داشته و در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان از جمله فعال‌سازی حداقل ۶۰ آنزیم مختلف درگیر در رشد و متابولیسم گیاه نقش کلیدی دارد (۲۵) و از جمله عناصر ضروری برای همه جانداران است که با سرعت زیادی توسط بافت‌های گیاهی جذب می‌شود (۲۶). پتاسیم به آسانی در سراسر گیاه حرکت می‌کند و به مقادیر زیادی در بخش‌های فعال و در حال رشد گیاهان وجود دارد (۹). نتایج پژوهش‌های بسیار نشان می‌دهد که کاربرد پتاسیم می‌تواند بر محتوای کادمیم تجمع‌یافته در گیاه تأثیر داشته باشد (۱۴). گولسر و سونمز (۱۶) نشان دادند که با افزایش پتاسیم شاخه، میانگین غلظت کادمیم به‌طور قابل توجهی در شاخه کاهش یافت. کاربرد پتاسیم به‌منظور کاهش اثر آلایندگی کادمیم در گیاه گوجه‌فرنگی، موجب افزایش معنی‌داری در غلظت کادمیم در میوه و قسمت‌های هوایی و ریشه و کاهش غلظت پتاسیم در میوه و قسمت‌های هوایی و ریشه شد (۲۷). در تنباکو بهترین تیمار در کاهش آثار مخرب کادمیم (جلوگیری از رشد و فتوسنتز و القای تنش اکسیداتیو) تیمار ۰/۵ میلی‌مولار پتاسیم بود (۵۱). این تیمار باعث کاهش جذب کادمیم و بهبود میزان فتوسنتز خالص، غلظت CO_2 بین‌سلولی و هدایت روزنه‌ای و نیز میزان جذب پتاسیم، مس، منگنز و آهن نسبت به تیمار شاهد (بدون تیمار پتاسیم) شد. تیمار ۰/۵ میلی‌مولار پتاسیم باعث کاهش تجمع مالون دی‌آلدهید در شاخساره و ریشه تنباکو شد (۵۱). جذب و انتقال مواد مغذی ضروری مانند پتاسیم، کلسیم، فسفر و منیزیم و نیز کارایی استفاده از آب در مقادیر زیاد کادمیم کاهش می‌یابد (۱۱). کادمیم جذب‌شده از سطح ریشه، یا به دیواره سلولی متصل شده و یا از طریق کانال‌های شبه‌پروتئین و یا از طریق کانال‌های کاتیون (مانند Ca^{2+}) از غشای پلاسمایی عبور می‌کند (۵۰). عناصر غذایی در جذب، انتقال و متابولیسم با یکدیگر برهم‌کنش دارند، به‌گونه‌ای که اگر غلظت برخی عناصر در محیط زیاد باشد از جذب برخی عناصر دیگر جلوگیری می‌کنند، این پدیده اثر آنتاگونیستی عناصر نامیده می‌شود (۴۵). این فرضیه وجود دارد عناصری که دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و نیز جذب و انتقال مشابهی هستند به‌صورت آنتاگونیستی عمل می‌کنند (۱). به علاوه کاتیون‌های تک‌ظرفیتی مانند K^+ و Na^+ از جذب کادمیم درون سلولی جلوگیری می کنند؛ از این‌رو کاربرد پتاسیم می‌تواند بر محتوای کادمیم گیاه اثر داشته باشد (۱۵). احتمالاً غلظت زیاد و سمّی کادمیم در محیط ریشه و در نتیجه جذب آن توسط گیاه و ایجاد اختلال در ساز و کار متابولیسمی گیاه، باعث کاهش تأثیرپذیری آنزیم‌هایی مانند آنزیم‌های درگیر در فتوسنتز (۱۹)، متابولیسم نیتروژن (۳۵) و بیوسنتز اتیلن (۳۶) از پتاسیم می‌شود (۳۱). بنابراین به این دلیل وجود غلظت‌های بیش‌تر از حد معمول پتاسیم برای کاهش تأثیر منفی کادمیم در حالتی که غلظت این عنصر در محیط در حد سمیّت است، قابل توجیه است (۱۲). در بین محصولات کشاورزی، سبزیجات و صیفی‌ها بیش‌تر در معرض آثار سوء ناشی از تجمع عناصری مانند کادمیم قرار دارند.

استفاده از راهکارهایی برای مقابله با تنش فلزات سنگین از جمله استفاده از کودهای شیمیایی متداول و نیز بررسی پتانسیل هر یک از محصولات کشاورزی در جذب و تجمع فلزات سنگین در بخش‌های مختلف گیاه، نقش بسزایی در کاهش آثار تنش‌های محیطی و سمیّت فلزات سنگین بر رشد گیاهان دارد. در این بین گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) گیاهی است علفی و یک ساله از خانواده بادمجانیان که کادمیم زیادی در ریشه و اندام های هوایی خود تجمع می‌دهد (۲۹). از این‌رو هدف پژوهش حاضر بررسی کارایی استفاده از پتاسیم در کاهش اثر کادمیم در کشت هیدروپونیک و نیز ارزیابی ویژگی‌های بیوشیمیایی و غلظت برخی از عناصر غذایی مفید در برگ و میوه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش فلزات سنگین کادمیم است.

مواد و روش‌ها

بذر گوجه فرنگی رقم Super cheif از شرکت BONANZA (آمریکا) با خلوص ۹۹ درصد و قابلیت جوانه‌زنی ۸۵ درصد

تهیه شد. از گلدان‌های پلاستیکی ۱۲ لیتری به‌عنوان ظروف کاشت و از ماسه به‌عنوان بستر کاشت استفاده شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با فاکتور پتاسیم در سه سطح (شاهد:K_1) ۱۰۰، ۲۰۰ (K_2) و ۳۰۰ (K_3) میلی‌گرم بر لیتر از منبع نیترات پتاسیم (KNO_3) و فاکتور کادمیم در سه سطح صفر (شاهد: Cd_1)، ۲ (Cd_2) و ۴ (Cd_3) میلی‌گرم بر لیتر از منبع سولفات کادمیم ($3CdSO_4.8H_2O$) در سه تکرار اجرا شد و هر واحد آزمایشی شامل یک گلدان بود. در مورد تیمار شاهد تنها از محلول هوگلند استفاده شد و در سایر تیمارها مقادیر یادشده Cd و K به محلول هوگلند افزوده شده و سپس مصرف شد. pH محلول غذایی در مقدار ۶/۵ تنظیم شد و برای این منظور از اسید سولفوریک یک مولار استفاده شد. تیمارهای مورد نظر از زمان چهار برگی گیاهان اعمال شد و به‌طور میانگین به هر گلدان هر روز حدود یک لیتر از محلول تیماری داده شد. دمای محیط گلخانه در طی روز حدود ۳±۲۵ و در شب ۳±۲۰ درجه سلسیوس بود. در طول آزمایش به‌طور تصادفی از هر واحد آزمایشی یک گلدان برداشت شده و وزن تازه و خشک آنها اندازه‌گیری شد (۱۰).

اندازه‌گیری غلظت عناصر

اندازه‌گیری غلظت عناصر به روش دونگ و همکاران (۱۰) انجام گرفت. در این روش ابتدا ۱ گرم از ماده خشک گیاهی (برگ و میوه) توزین شده و به لوله‌های هضم منتقل شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به هر لوله افزوده شد. پس از چیدن لوله‌ها درون حفره‌های اجاق هضم، روی لوله‌ها با درپوش مخصوص آن گرفته شدند. نمونه‌ها تا روز بعد بدون اعمال هیچ دمایی رها شدند. در روز بعد نمونه‌ها به‌مدت ۳ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. پس از ۳ ساعت، دما به‌تدریج تا ۱۱۰ درجه سلسیوس افزایش داده شد و برای ۶ ساعت عمل هضم انجام گرفت. نشانه اتمام هضم، به‌دست آمدن مایع زلال زرد رنگ بود. سپس لوله‌ها از روی اجاق هضم برداشته شده و در جالوله‌ای قرار گرفتند تا خنک شوند. سپس عصاره حاصل توسط کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف شد و توسط آب مقطر در بالن ژوژه‌ها به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت عصاره‌ها به فلاسک‌های حجمی دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA6300, Japan) برای تعیین غلظت عناصر روی، آهن و کادمیم در نمونه‌های گیاهی منتقل شد.

سنجش هیدروژن پراکساید، مالون دی‌آلدئید، پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو

برای سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو، غلظت هیدروژن پراکساید، پروتئین و مالون دی‌آلدئید از میوه‌های گیاهان تحت تیمار، نمونه‌برداری انجام شده و نمونه‌ها در نیتروژن مایع فریز شدند. میزان هیدروژن پراکساید به روش سرگیو و همکاران (۳۷) اندازه‌گیری شده و میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۳۹۰ نانومتر قرائت شد. پس از رسم منحنی استاندارد H_2O_2 در غلظت‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ میکرومول در لیتر و با استفاده از فرمول حاصل ($Y= 0.5327 x + 0.0437$)، میزان هیدروژن پراکساید بر حسب میکرومول بر گرم محاسبه شد. میزان مالون دی‌آلدئید با روش ارائه‌شده توسط استوارت و باولی (۴۶) تعیین شد. میزان جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر قرائت شد. در این روش میزان پراکسیدشدن لیپیدها از اختلاف بین طول موج‌های جذبی در ضریب خاموشی $155\ mmol^{-1}$ به‌دست آمد. میزان پروتئین کل برای هر یک از نمونه‌های میوه بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه از روی منحنی استاندارد حاصل از آلبومین سرم گاوی در طول موج ۵۳۵ نانومتر به‌دست آمد (۴). فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (GPX) به روش چاکماک (۵) انجام گرفت. در این روش ۰/۲ گرم نمونه میوه در نیتروژن مایع پودر شده، سپس ۱/۸ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم با pH=۷ به آن افزوده شده و نمونه‌ها درون سانتریفیوژ (2216MK) به‌مدت ۱۸ دقیقه در ۲۰۰۰ دور و دمای ۴ درجه سلسیوس قرار داده شدند. سپس محلول رویی جدا شده و در دمای ۲۴- درجه سلسیوس قرار گرفت. برای اندازه‌گیری مقدار آنزیم پراکسیداز ۵۰ میکرولیتر

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف کادمیم و پتاسیم بر صفات بیوشیمیایی میوه گوجه‌فرنگی.

Table 1. Analysis of variance for the effect of different levels of cadmium and potassium on the biochemical traits of tomato.

منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)			
		مالون دی‌آلدهید MDA	گایاکول پر اکسیداز GPX	پروتئین محلول Total protein	پراکسید هیدروژن H_2O_2
کادمیم (Cadmium)	2	7445.81**	6433.16**	100.89**	0.0148**
پتاسیم (Potassium)	2	1021.14**	4213.75**	118.77**	0.214**
برهم‌کنش کادمیم × پتاسیم (Cadmium × Potasium)	4	55.31*	205.5*	3.13ns	0.193*
اشتباه آزمایشی (Error)	18	20.70	55.82	4.18	2.47
ضریب تغییرات (CV)		2.77	2.49	18.44	0.54

** : اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد ، *: اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns بدون اثر معنی‌دار

**: Significant at 1% probability level, *: Significant at 5% probability level, ns: non-significant

روشناور، ۷۰۰ میکرولیتر محلول گایاکول و ۷۰۰ میکرولیتر محلول هیدروژن پراکساید و ۷۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم به کووت‌های کوارتزی افزوده شده و میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر (UNIC V2100) در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت شد. واکنش به‌مدت یک دقیقه ادامه یافت و عدد حاصل از اسپکتروفتومتر پس از ۶۰ ثانیه دوباره قرائت شد. فعالیت آنزیمی بر اساس میزان تتراگایاکول تشکیل شده و با استفاده از ضریب خاموشی ۲۶/۶ $mM^{-1}cm^{-1}$ محاسبه شد و میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز برحسب میکرومول گایاکول اکسیدشده در دقیقه بر گرم وزن تازه بیان شد.

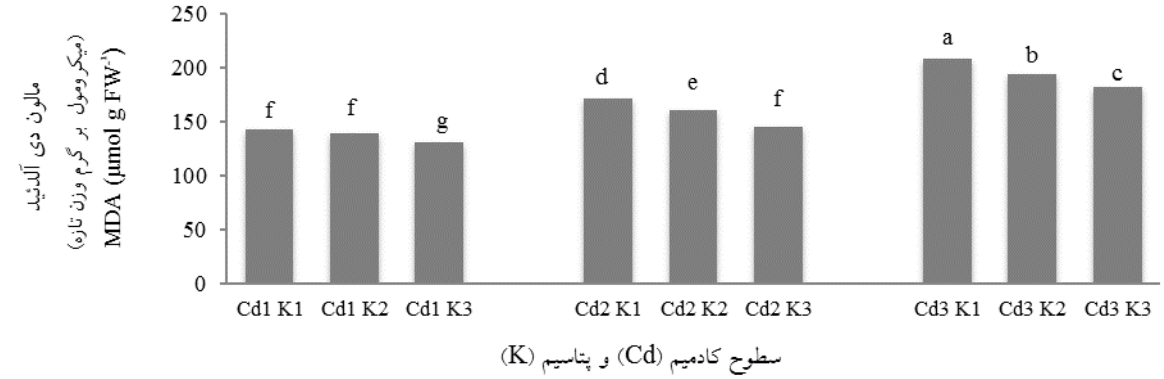
تجزیه آماری

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تجزیه واریانس داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش به‌وسیله نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel 2010 استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به اثر سطوح مختلف کادمیم و پتاسیم بر مقدار مالون دی‌آلدهید، فعالیت گایاکول پراکسیداز، پروتئین محلول کل و پراکسید هیدروژن در جدول (۱) نشان داده شده است.

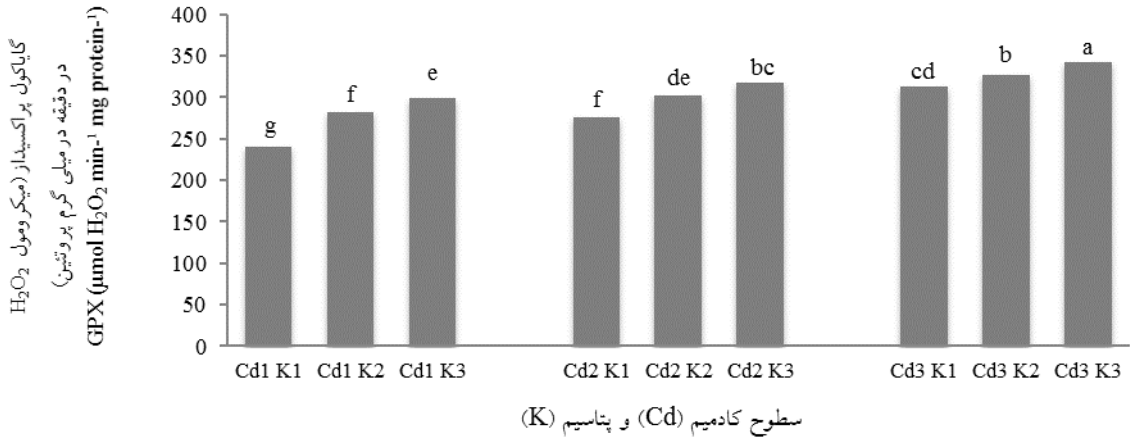
مالون دی‌آلدئید (MDA): با توجه به معنی‌داربودن اثر برهم‌کنش کادمیم و پتاسیم بر مقدار مالون دی‌آلدئید در میوه (جدول ۱)، بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت مالون دی‌آلدئید در میوه‌ها، ۲۰۸/۳ و ۱۳۰/۲ میکرومول برگرم وزن تازه به‌ترتیب در تیمارهای Cd_3K_1 و Cd_1K_3 است. با افزایش پتاسیم در محلول غذایی غلظت مالون دی‌آلدئید از ۱۴۲/۶ میکرومول بر گرم وزن تازه در شاهد (Cd_1K_1) به ۱۳۹/۶و ۱۳۰/۶۶ میکرومول بر گرم وزن تازه به‌ترتیب در تیمارهای Cd_1K_2 و Cd_1K_3 کاهش یافت (شکل ۱). مالون دی‌آلدئید یک نشانگر زیستی برای تشخیص پراکسیداسیون لیپید محسوب می‌شود (۱۸). در صورت وجود فلزات سنگین در محیط رشد گیاهان، تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن و در نتیجه پراکسیداسیون لیپید افزایش می‌یابد (۴۰)، درحالی که کاربرد توام پتاسیم، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مقدار مالون دی‌آلدئید را کاهش می‌دهد. پتاسیم از تخریب ساختمان لیپیدهای دیواره سلولی محافظت کرده و باعث ثبات و جلوگیری از اختلال عمل در دیواره سلولی گیاهان رشدیافته در شرایط تنش می‌شود (۲۴).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح مختلف پتاسیم و کادمیم بر میزان مالون دی‌آلدئید (MDA) در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌هایی که دارای یک حرف مشترک هستند دارای تفاوت معنی‌دار نیستند (دانکن ۵ درصد).

(Cd1: 0 mg L^{-1} Cd, Cd2: 2 mg L^{-1} Cd, Cd3: 4 mg L^{-1} Cd, K1: 100 mg L^{-1}, K2: 200 mg L^{-1} K, K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 1. Mean comparisons of the interaction effect of different levels of potassium and cadmium on the malondialdehyde (MDA) content of tomato; Columns with the same letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

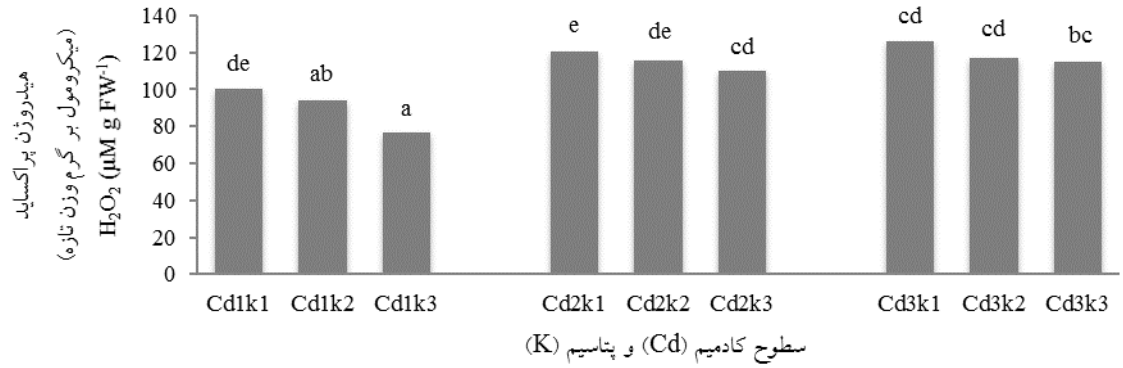


شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح مختلف پتاسیم و کادمیم بر فعالیت آنزیم گایاگول پراکسیداز (GPX) در میوه گوجه فرنگی؛ ستون‌هایی که دارای یک حرف مشترک هستند دارای تفاوت معنی‌دار نیستند (دانکن ۵ درصد).

(Cd1: 0 mg L^{-1} Cd, Cd2: 2 mg L^{-1} Cd, Cd3: 4 mg L^{-1} Cd, K1: 100 mg L^{-1}, K2: 200 mg L^{-1} K, K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 2. Mean comparisons of the interaction effect of different levels of potassium and cadmium on the guaiacol peroxidase (GPX) activity of tomato; Columns with the same letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (GPX): نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که سطوح مختلف پتاسیم و کادمیم در محلول غذایی در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم GPX میوه داشتند. همچنین برهم‌کنش کادمیم و پتاسیم بر فعالیت آنزیم GPX میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). همانطور که در شکل (۲) مشخص است بیش‌ترین فعالیت GPX میوه‌ها در سطح ۳ کادمیم (۴ میلی‌گرم در لیتر) و بیش‌ترین حد پتاسیم (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به‌دست آمد و کم‌ترین فعالیت این آنزیم در تیمار دارای کم‌ترین حد پتاسیم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و کم‌ترین حد کادمیم (صفر میلی‌گرم در لیتر) مشاهده شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش پتاسیم در محلول غذایی، فعالیت آنزیم GPX از ۲۴۰/۴۸ میکرومول هیدروژن پراکسید در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین در تیمار شاهد (Cd1K1) به ۲۸۱/۲۹۸ و



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سطوح مختلف پتاسیم و کادمیم بر مقدار هیدروژن پر اکساید (H_2O_2) در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌هایی که دارای یک حرف مشترک هستند دارای تفاوت معنی‌دار نیستند (دانکن ۵ درصد).

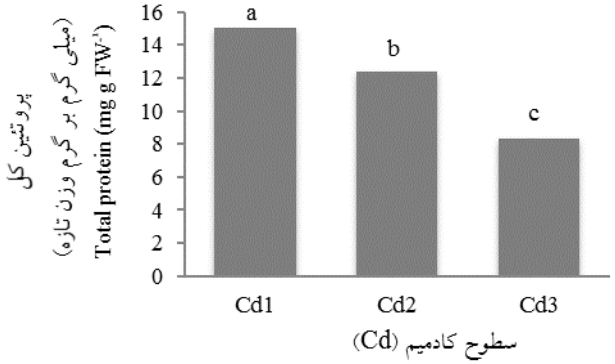
(Cd1: 0 mg L^{-1} Cd, Cd2: 2 mg L^{-1} Cd, Cd3: 4 mg L^{-1} Cd, K1: 100 mg L^{-1}, K2: 200 mg L^{-1} K, K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 3. Mean comparisons of the interaction effect of different levels of potassium and cadmium on the hydrogen peroxide (H_2O_2) content of tomato; Columns with the same letter are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

۲۹۸/۸۷ میکرومول هیدروژن پراکسید در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین به‌ترتیب در تیمارهای Cd1K2 و Cd1K3 افزایش یافت که اختلاف بین تیمارهای Cd1K2 و Cd1K3 معنی‌دار بود. میانگین درصد افزایش آنزیم GPX برای تیمارهای Cd1K2 و Cd1K3 به‌ترتیب ۱۷/۲۵و ۲۴/۲۸ درصد نسبت به شاهد (Cd1K1) بود. بدین ترتیب در سایر تیمارها نیز کاربرد توأم پتاسیم با کادمیم در محلول غذایی، فعالیت آنزیم GPX را افزایش داد (شکل ۲). مکان فعالیت آنزیم گایاگول پراکسیداز در سیتوزول، دیواره سلولی، واکوئل و فضای بین‌سلولی است و در شرایط شوری و سمیّت فلزات سنگین، فعالیت این آنزیم به‌عنوان نشانگر زیستی برای بیان شدت تنش به‌کار می‌رود (۳۹). از این‌رو گایاکول پراکسیداز به‌عنوان آنزیم تنش تلقی می‌شود. فعالیت این آنزیم در پاره‌ای از شرایط تنش مانند تنش آبی (۵۴) و تنش فلزات سنگین مانند آلومینیوم، مس و کادمیم (۳۹) افزایش می‌یابد. در بسیاری از گیاهان جذب زیاد فلزات سنگین باعث افزایش فعالیت گایاکول پراکسیداز می‌شود (۲). سلیمان‌زاده و همکاران (۴۳) با کشت گیاه آفتابگردان تحت تنش خشکی، افزایش قابل توجهی در فعالیت آنزیم‌های سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز و گایاکول پراکسیداز و کاهش در MDA در مقایسه با تیمار شاهد، مشاهده کردند. همچنین گیاهانی که با سطوح زیادتری از پتاسیم تیمار شده بودند، مقاومت بیش‌تری در برابر تنش خشکی نشان داده و عملکرد بیش‌تری داشتند. با توجه به نقش پتاسیم به‌عنوان اسمولیت معدنی در تنظیم اسمز و ایجاد فشار تورژسانس، این عنصر در بزرگ‌شدن یاخته‌ها، رشد گیاه، باز و بسته شدن روزنه‌ها، حرکات برگ و تروپیسم‌ها نیز تأثیر بسزایی دارد (۳۲).

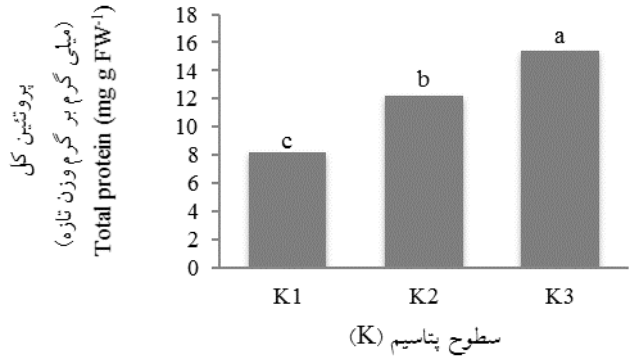
اثر پتاسیم در افزایش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در حضور عنصر سمّی کادمیم را می‌توان به اثر مثبت این عنصر در فعال‌سازی تعداد زیادی از آنزیم‌های فتوسنتزی، ساخت پروتئین، متابولیسم اکسیداتیو و تعادل بار الکتریکی غشاهای یاخته نسبت داد (۳۰).

پراکسید هیدروژن: اثر برهم‌کنش کادمیم و پتاسیم بر غلظت هیدروژن پراکساید در میوه گوجه‌فرنگی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). با توجه به شکل (۳) مشخص می‌شود که با افزایش تنش کادمیم، غلظت هیدروژن پراکساید در میوه‌ها افزایش می‌یابد که مشابه با نتایج پژوهشگران دیگر است (۲۲)، ولی افزودن پتاسیم به محلول غذایی غلظت هیدروژن پراکساید را در میوه‌های تحت تنش تعدیل می‌کند. رادیکال‌های فعال اکسیژن مانند پراکساید (O_2^-) و هیدروژن پراکساید (H_2O_2) باعث تبدیل اسیدهای چرب به ترکیبات



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کادمیم بر میزان پروتئین کل در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (Cd1: 0, Cd2: 2 and Cd3: 4 mg L^{-1} Cd)

Fig. 4. Mean comparisons of the effect of different levels of cadmium on the total protein of tomato; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۵. اثر سطوح مختلف پتاسیم بر میزان پروتئین کل در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (K1: 100, K2: 200 and K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 5. The effect of different levels of potassium on the total protein of tomato; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

لیپید شده و این ترکیبات غشاهای بیولوژیک را از بین می‌برند (۵۳). کادمیم باعث تولید هیدروژن پراکساید (H_2O_2) می‌شود و در نتیجه فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیداتیو افزایش می‌یابد و آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو باعث نگهداری استحکام دیواره سلولی می‌شوند.

پروتئین محلول کل: در اثر کاربرد کادمیم، میانگین غلظت پروتئین کل از ۱۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه در تیمار شاهد به ۱۲/۳۴ و ۸/۳۴ به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2 و Cd_3 کاهش یافت و بیش‌ترین غلظت پروتئین محلول کل مربوط به تیمار شاهد بود (شکل ۴). از طرفی کاربرد پتاسیم، میانگین غلظت پروتئین محلول کل را از ۸/۱۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه در تیمار شاهد به ۱۲/۲۱ و ۱۵/۳۶ به‌ترتیب در تیمارهای K_2 و K_3 افزایش داد (شکل ۵). کاهش زیتوده و کیفیت غذایی در محصولات رشد کرده در خاک آلوده با مقدار میانگین فلزات سنگین در منابع متعددی مشاهده شده است (۸). فلزات سنگین، حتی در غلظت کم در رشد گیاه اختلال ایجاد کرده و از فتوسنتز، سوخت‌وساز قند، جذب سولفات و فعالیت آنزیم‌ها جلوگیری به عمل می‌آورند (۴۵). سنتز پروتئین نیز تا حد زیادی در اثر تیمار با کادمیم تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۳) که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. احتمالاً کاهش در مقدار پروتئین می‌تواند به‌علت کاهش در سنتز پروتئین و یا افزایش در میزان تخریب پروتئین

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تأثیر کادمیم و پتاسیم بر غلظت عناصر غذایی در برگ و میوه گوجه‌فرنگی.

Table 2. Analysis of variance for the effect of cadmium and potassium on the concentration of nutrients in the leaf and fruit of tomato.

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)						
		آهن (میوه) Fruit Fe	روی (برگ) Leaf Zn	روی (میوه) Fruit Zn	کادمیم (برگ) Leaf Cd	کادمیم (میوه) Fruit Cd	پتاسیم (میوه) Fruit K	پتاسیم (برگ) Leaf K
کادمیم (Cadmium)	2	1685.0**	199.9**	455.7**	2733.7**	40481.7**	627.1**	481.6**
پتاسیم (Potassium)	2	585.3**	162.9**	502.6**	91.9**	1211.5**	263.4**	398.6**
برهم‌کنش کادمیم × پتاسیم (Cadmium × Potassium)	4	32.6ns	11.7ns	21.6**	25.6*	341.7*	95.5ns	10.7 ns
اشتباه آزمایشی (Error)	18	12.9	10.0	24.8	7.0	83.1	0.005	0.002
ضریب تغییرات (CV)		6.1	6.3	18.3	13.9	13.3	18.82	14.43

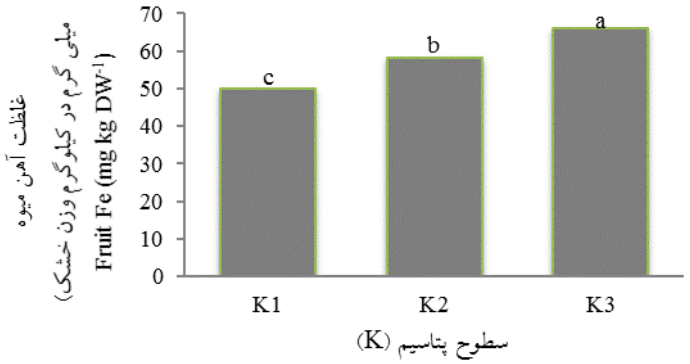
**: اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *: اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns بدون اثر معنی‌دار

**: Significant at 1% probability level, *: Significant at 5% probability level, ns: non-significant

باشد (۲). اما از آنجایی که پتاسیم در روزنه برای تنظیم آب در گیاهان لازم است، این امر به فعال‌سازی آنزیم کمک کرده و برای متابولیسم کربوهیدرات و انتقال آن‌ها، متابولیسم نیتروژن و سنتز پروتئین و تنظیم غلظت شیره سلولی لازم است (۱۳). با کاربرد نیترات پتاسیم میانگین غلظت پروتئین محلول کل از ۸/۱۱ در تیمار شاهد (K1) به ۱۲/۲۱ و ۱۵/۳۶ به‌ترتیب در تیمارهای ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته که اختلاف بین تیمارهای K2 و K3 معنی‌دار بود. شعبانی و همکاران (۳۸) نشان دادند که پتاسیم، ترکیبات شیمیایی میوه را از طریق افزایش مقدار پروتئین، نشاسته، مواد جامد محلول و اسید آسکوربیک بهبود می‌بخشد و در نتیجه باعث بهبود کیفیت و نگهداری آن می‌شود.

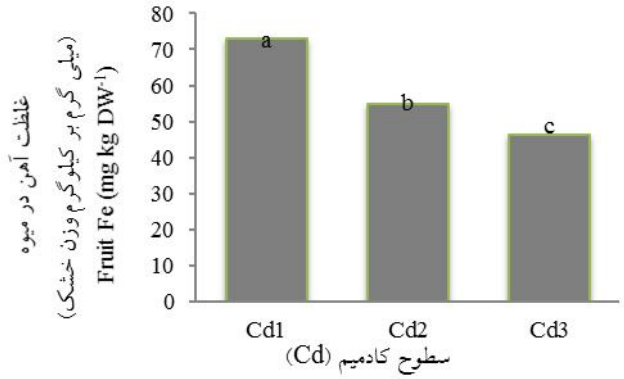
غلظت عناصر غذایی: کاربرد پتاسیم همچنین اثر معنی‌داری بر مقدار آهن میوه داشت (جدول ۲)، به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۴۹/۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار K_1 به ۵۸/۲۱ و ۶۶/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به‌ترتیب در تیمارهای K_2 و K_3 افزایش یافت (شکل ۶). کاربرد پتاسیم در گوجه‌فرنگی سبب افزایش جذب و متابولیسم آهن رشد رویشی، عملکرد و مقدار مواد مغذی برگ خیار و گوجه‌فرنگی شد (۱۷) اما با کاربرد سولفات کادمیم، میانگین غلظت آهن در میوه از ۷۲/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_1 به ۵۴/۹۴ و ۴۶/۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2 و Cd_3 کاهش یافت (شکل ۷). کاهش غلظت آهن با افزایش غلظت کادمیم را ناشی از آثار آنتاگونیستی این دو عنصر گزارش کرده‌اند (۵۲). جعفری و همکاران (۲۳) نشان دادند که با مصرف کادمیم و روی، غلظت آهن در دانه گندم کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد که خاصیت آنتاگونیستی کادمیم در هنگام جذب با برخی از عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی، باعث این پدیده می‌شود.

در بررسی اثر کادمیم بر میزان روی در برگ و میوه گوجه-فرنگی معلوم شد که با کاربرد سولفات کادمیم میانگین غلظت روی در برگ از ۵۶/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_1 به ۴۵/۲۶ و ۳۷/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2 و Cd_3 کاهش یافت (شکل ۸). این در حالی است که غلظت روی در میوه به‌طور کلی کم‌تر از برگ بوده و تحت تنش کادمیم مقدار آن از ۳۳/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_1 به ۲۷/۶۴ و ۱۹/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2 و Cd_3



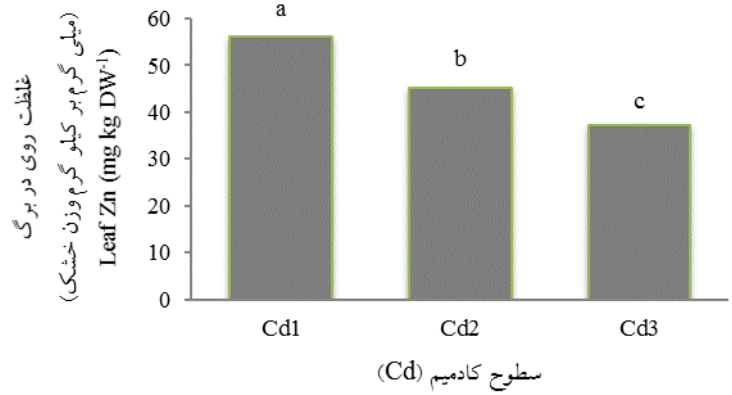
شکل ۶. اثر سطوح مختلف پتاسیم بر غلظت آهن در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (K1: 100, K2: 200 and K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 6. The effect of different levels of potassium on the tomato fruit Fe; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



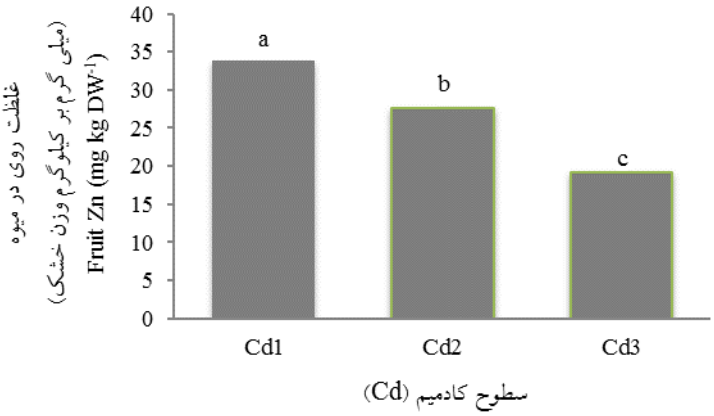
شکل ۷. اثر سطوح مختلف کادمیم بر غلظت آهن در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (Cd1: 0, Cd2: 2 and Cd3: 4 mg L^{-1} Cd)

Fig. 7. The effect of different levels of cadmium on the tomato fruit Fe; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



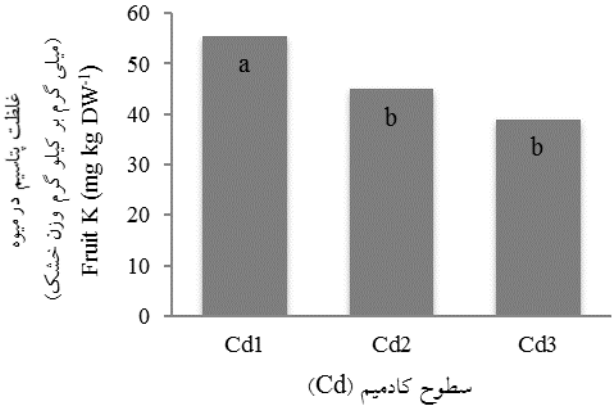
شکل ۸. اثر سطوح مختلف کادمیم بر غلظت روی در برگ گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (Cd1: 0, Cd2: 2 and Cd3: 4 mg L^{-1} Cd)

Fig. 8. The effect of different levels of cadmium on the tomato leaf Zn; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



شکل ۹. اثر سطوح مختلف کادمیم بر غلظت روی در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (Cd1: 0, Cd2: 2 and Cd3: 4 mg L^{-1} Cd)

Fig. 9. The effect of different levels of cadmium on the tomato fruit Zn; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



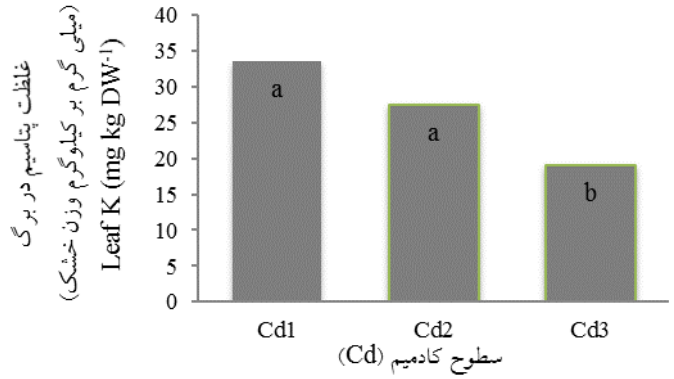
شکل ۱۰. اثر سطوح مختلف کادمیم بر غلظت پتاسیم در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (Cd1: 0, Cd2: 2 and Cd3: 4 mg L^{-1} Cd)

Fig. 10. The effect of different levels of cadmium on the tomato fruit K; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

کاهش یافت (شکل ۹). روی عنصری ضروری برای رشد گیاهان محسوب می‌شود و در گیاه نیز نسبت به آهن، مولیبدن و کلسیم (۴۸) از تحرک و انتقال بیش‌تری برخوردار است (۴۷).

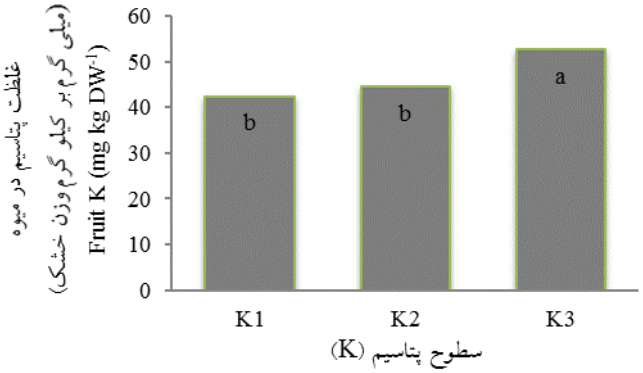
غلظت روی در کلم چینی در غلظت‌های کم کادمیم موجود در محیط رشد، افزایش یافت ولی غلظت روی در مقادیر بیش‌تر کادمیم در محیط رشد، کاهش نشان داد. در کشت هیدروپونیک نبود مواد آلی و ذرات رس باعث می‌شوند که فراهمی فلزات نسبت به شرایطی که در محلول خاک وجود دارد، افزایش یابد (۴۱). با توجه به اینکه روی و کادمیم از نظر شیمیایی بسیار شبیه به هم بوده و این یون‌ها از طریق ناقل‌های پروتئینی مشترک وارد سلول می‌شوند و در حین جذب توسط سلول‌های ریشه با هم رقابت می‌کنند، هر دو یون روی و کادمیم باعث اختلال در جذب یکدیگر می‌شوند (۲۰).

با کاربرد سولفات کادمیم، میانگین غلظت پتاسیم در میوه و برگ به‌ترتیب از ۵۵/۵۰ و ۳۳/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک در تیمار Cd_1 به ۴۴/۹۰ ، ۳۹/۰۳ و ۲۷/۶۴، ۱۹/۰۴



شکل ۱۱. اثر سطوح مختلف کادمیم بر غلظت پتاسیم در برگ گوجه فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (Cd1: 0, Cd2: 2 and Cd3: 4 mg L^{-1} Cd)

Fig. 11. The effect of different levels of cadmium on the tomato leaf K; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).



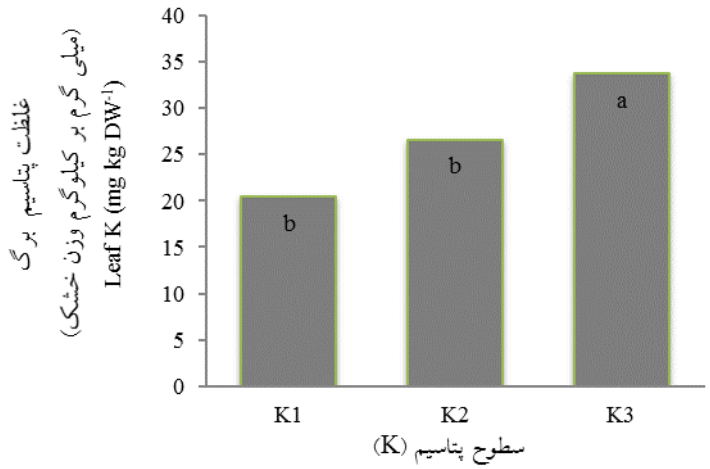
شکل ۱۲. اثر سطوح مختلف پتاسیم بر غلظت پتاسیم در میوه گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (K1: 100, K2: 200 and K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 12. The effect of different levels of potassium on the tomato fruit K; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به‌ترتیب در تیمارهای Cd_2 و Cd_3 کاهش یافت (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در یک پژوهش که در مورد آثار سمّی کادمیم در انباشته‌شدن عناصر معدنی در سیب‌زمینی انجام شد، کاهش غلظت پتاسیم به مقدار قابل توجهی در اندام‌های هوایی و ریشه مشاهده شد ولی با این‌حال آثار کادمیم بر غلظت مواد مغذی بستگی به سطوح مختلف کادمیم، رقم، بافت گیاهی، نوع مواد مغذی و مرحله رشد گیاه دارد (۷). گزارش‌های متعددی نیز مبنی بر کاهش جذب پتاسیم در لوبیا و نخود (۳۳) در حضور کادمیم وجود دارد.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد نیترات پتاسیم، میانگین غلظت پتاسیم میوه و برگ به تدریج با افزایش مقدار کود بکار رفته، افزایش می‌یابد و بیش‌ترین مقدار پتاسیم در میوه تجمع می‌یابد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

هوازدگی کانی‌های پتاسیمی و تداوم مصرف کودهای پتاسیمی از عوامل مؤثر بر ورود پتاسیم به بخش قابل دسترس در خاک است. مقدار جذب پتاسیم توسط گیاه از جذب هر عنصر غذایی دیگری به غیر از نیتروژن بیش‌تر بوده و در برخی از گیاهان حتی از جذب نیتروژن نیز بیش‌تر است. پتاسیم



شکل ۱۳. اثر سطوح مختلف پتاسیم بر غلظت پتاسیم در برگ گوجه‌فرنگی؛ ستون‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار هستند (دانکن ۵ درصد). (K1: 100, K2: 200 and K3: 300 mg L^{-1} K)

Fig. 13. The effect of different levels of potassium on the tomato leaf K; Columns with different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

برخلاف نیتروژن و فسفر، نقش ساختمانی در گیاه ندارد ولی باتوجه به نقش‌های آنزیمی و کوآنزیمی در گیاه، عنصر بسیار حساس و مهمی در گیاه به شمار می‌رود به‌طوری که حداقل ۵۰ آنزیم گیاهی به‌طور کامل و یا مقدار زیادی از فعالیت‌شان به پتاسیم بستگی دارد. پتاسیم با تنظیم فشار اسمزی سلول‌های روزنه برگ، گیاه را در برابر خشکی مقاوم می‌سازد. پتاسیم سبب انتقال قندها در آوندهای آبکش شده و با انتقال آن به سایر اندام‌ها، رشد آنها را تضمین می‌کند. پتاسیم تحمل گیاه را نسبت به امراض، سرما و خشکی افزایش داده و استحکام گیاه را موجب می‌شود (۲۱). پتاسیم علاوه بر افزایش تولید و بهبود کیفیت محصول، سبب افزایش تحمل گیاهان به شوری، کم آبی، آفات و بیماری‌ها می‌شود. گزارش‌های زیادی مبنی بر افزایش مقدار پتاسیم با کاربرد کود پتاسیم در شاخه و ریشه گیاهان وجود دارد (۲۸ و ۵۶).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که با کاربرد پتاسیم، غلظت پتاسیم در میوه و برگ گوجه فرنگی افزایش یافت. کاربرد توام پتاسیم و کادمیم بر میزان فعالیت گایاکول پراکسیداز، مقدار مالون دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن معنی‌دار بود و باعث کاهش آثار مضر ناشی از فلز سنگین شد ولی میزان جذب آهن و پتاسیم در میوه تنها تحت تأثیر کاربرد پتاسیم قرار گرفت. آثار اصلی و برهم‌کنش پتاسیم و کادمیم بر غلظت کادمیم برگ و میوه معنی‌دار بود و با افزایش غلظت کادمیم در محلول غذایی، غلظت کادمیم برگ و میوه افزایش یافت ولی کاربرد توام پتاسیم و کادمیم باعث کاهش غلظت کادمیم در برگ و میوه گوجه‌فرنگی شد.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تقدیر و تشکر خود را از دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه (گروه علوم و مهندسی باغبانی و گروه علوم و مهندسی خاک) به‌خاطر حمایت مالی پایان‌نامه، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه مراغه (شاعا) و نیز گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه تهران به‌خاطر مساعدت در انجام پاره‌ای از آزمایشات مربوط به پژوهش اعلام دارند.

منابع مورد استفاده

1. Aravinad, P., Narasimba, M., Prasad, V., 2005. Cadmium-zinc interactions in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: Adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17(1): 3–20.
2. Balestrasse, K.B., Benavides, M.P., Gallego, S.M., Tomaro, M.L., 2003. Effect of cadmium stress on nitrogen metabolism in nodules and roots of soybean plants. *Functional Plant Biology* 30: 57–64.
3. Bavi, K.H., Kholdebarin, B., Moradshahi, A., 2011. Effect of cadmium on growth, protein content and peroxidase activity in pea plants. *Pakistan Journal of Botany* 43(3): 1467–1470.
4. Bradford, M.M., 1979. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248–254.
5. Cakmak, I., 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells damage by reactive oxygen species. *New Phytologist. Annals of Biological Research* 3: 5486–5489.
6. Ci, D., Jiang, D., Dai, T., Jing, Q., Cao, W., 2009. Effects of cadmium on plant growth and physiological traits in contrast wheat recombinant inbred lines differing in cadmium tolerance. *Chemosphere* 77(11): 1620–1625.
7. Concalves, J.F., Antes, F.G., Maldaner, J., Pereira, L.B., Tabaldi, L. A., Rauber, R., Rassato, L.V., Bisognin, D.A., Dressler, V.L., Flores, E.M.M., Nicoloso, F.T., 2009. Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* 47: 814–821.
8. Cottoine, A., Dhaese, A., Carmerlynck, R., 1976. Plant quality response to uptake of polluting elements. Qualitas Planta –rum- Plant Foods for Human Nutrition. *American Journal of Botany* 26: 293–319.
9. Din, M., Qasim, M., Alam, M., 2007. Effect of different levels of N, P and K on the growth and yield of cabbage. *Journal of Agricultural Research (Pakistan)*.
10. Dong, J., Wu, F., Zhang, G., 2006. Influence of cadmium antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedling (*Lycopersicon esculentum*). *Plant Physiology and Biochemistry* 64: 1659–1666.
11. Duman, F. (2012). Uptake of mineral elements during abiotic stress. In: Ahmad, P., Prasad, M.N.V. (Eds.), Abiotic Stress Responses in Plants, Springer, New York, NY, pp. 267–281.
12. Ghasemi, Z., Shahabi, A.A., 2011. Effect of potassium and zinc on growth and physiological parameters of tomato under cadmium stress in soilless system. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 1(4): 1–10. (in Persian with English abstract)
13. Gould, W.A., 1983. Tomato production, processing, and quality evaluation. *Journal of Occupational Health Psychology* 1: 161–165.
14. Grant, C.A., Bailey, L.D., 1997. Effects of phosphorus and zinc fertilizer management on cadmium accumulation in flax seed. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 73: 307–314.
15. Grant, C.A., Buckley, W.T., Bailey, L.D., Selles, F., 1997. Cadmium accumulation in crops. *Canadian Journal of Plant Science* 78: 1–17.
16. Guler, S.H., Hayriye, L., Ibrikci, F., Buyuk, G., 2006. Effect of different nitrogen rates on yield and leaf nutrient content of drip-fertigated and greenhouse–grown cucumber. *Asian Journal of Plant Sciences* 4: 657–662.
17. Gülser, F., Sönmez, F., 2012, Cadmium effects on potassium content and pepper seedling growth in different peat ratios. *Eurasian Journal of Soil Science* 1(2): 110–115.
18. Gunes, A., Inal, A., Bagci, E.G., Cobanand, S., Pilbeam, D.J., 2007. Silicon mediates changes to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity. *Scientia Horticulturae* 113: 113–119.
19. Hafsi, C., Debez, A., Abdelly, C., 2014, Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. *Acta Physiologiae Plantarum* 36(5), 1055–1070.
20. Hart, J.J., Welch, R.M., Norvell, W.A., Kochian, L.V., 2002. Transport interactions between Cd and Zn in roots of bread and durum wheat seedlings. *Physiologia Plantarum* 45: 91–97.
21. Holmes, M.R., 1985. Nitrogen top-dressing requirements of winter oilseed rape. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 31: 119–127.
22. Hsu, Y.T., Kao, C.H., 2007. Cadmium-induced oxidative damage in rice leaves is reduced by polyamines. *Plant and Soil* 29(1): 27–37.
23. Jafari, S., Iranshahi, Z., Fathi, G.H., Siadat, S., 2009. The effect of different levels of cadmium and zinc on yield and microelements adsorption in wheat cv. Chamran. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 16(61): 167–179. (in Persian with English abstract)

24. Johnson, S.M., Doherty, S.J., Croy, R.R.D., 2003. Biphasic superoxide generation in potato tubers: self-amplifying response to stress. *Plant Physiology* 13: 1440–1449.
25. Joshuga, L., 2013. Nutritional recommendations for: Cucumber, in open field, tunnels and greenhouse. *Acta Horticulturae* 12: 231–237.
26. Kaila, A., 1967. Potassium status in different size fractions of some Finish soils. *Agricultural and Food Science* 39: 45–56.
27. Kamrani Alileh, M., Seyed Hajizadeh, H., Behtash, F., Mousavi, S.B., 2017. The effect of potassium in reducing cadmium stress and its effect on chemical composition of fruit tomato. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 9(3): 49–62. (in Persian with English abstract)
28. Khosravi, F., 2009. The effect of different levels and sources of potassium on phytoremediation of soil contaminated with cadmium. *Agronomy Journal* 90: 56–64. (in Persian with English abstract)
29. Kuboi, T., Noguchi, A., Yazaki, J., 1986. Family-dependent cadmium accumulation in higher plants. *Plant and Soil* 92: 405–415.
30. Liang, Y.C., 1999. Effects of silicon on enzyme activity and sodium potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil* 29: 217–224.
31. Malakuti, M., Shahabi, A.A., Bazargan, K., 2005. Potassium in Iranian Agriculture, Sena Publications, Tehran, pp 108–110. (in Persian)
32. Mittler, R., 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* 7: 405–410.
33. Obata, H., 1997. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium. *Journal of Plant Nutrition* 20: 97–105.
34. Pinto, E., Sigaud-kuther, T.C.S., Leitao, M.A.S., 2003. Heavy metal - induced oxidative stress in algae. *Journal of Applied Phycology* 39: 1008–1018.
35. Qu, C., Liu, C., Ze, Y., Gong, X., Hong, M., Wang, L., Hong, F., 2011. Inhibition of nitrogen and photosynthetic carbon assimilation of maize seedlings by exposure to a combination of salt stress and potassium-deficient stress. *Biological Trace Element Research* 144: 1159–1174.
36. Schachtman, D.P., Shin, R., 2007. Nutrient sensing and signaling: nPKS. *Annual Review of Plant Biology* 58: 47–69.
37. Sergiv, I., Alexieva, V., Karanov, E., 1997. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Comptes Rendus De L Academie Bulgare Des Sciences, Sci* 51: 121–124.
38. Shabani, E., Tabatabaei, S.J., Bolandnazar, S., Ghasemi, K., 2012. Vegetative growth and nutrient uptake of salinity stressed Cherry tomato in different calcium and potassium level. *International Research Journal of Basic and Applied Science* 3(9): 1845–1853.
39. Shah, K., Kumar, R.G., Verma, R.S., Dubey, R.S., 2001. Effect of cadmium on lipid peroxidation superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Science* 161: 1135–1144.
40. Shi, X., Zhang, C., Wang, H., Zhang, F., 2005. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. *Plant and Soil* 272: 53–60.
41. Shute, T., Macfie, S.M., 2006. Cadmium and zinc accumulation in soybean: A threat to food safety. *Science of the Total Environment* 371: 63–73.
42. Skrebsky, E.C., Tabaldi, L.A., Pereira, L.B., Rauber, R., Maldaner, J., Cargnelutti, D., Nicoloso, F.T., 2008. Effect of cadmium on growth, micronutrient concentration, and δ-amino levulinic acid dehydratase and acid phosphatase activities in plants of *Pfaffia glomerata*. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 20(4): 285–294.
43. Soleimanzadeh, H., Habibi, D., Ardakani, M.R., Paknejad, F., Rejali, F., 2010. Effect of potassium levels on antioxidant enzymes and malondialdehyde content under drought stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 5 (1): 56–61.
44. Song, A., Li, Z., Zhang, J., Xue, G., Fan, F., Liang, Y., 2009. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity. *Journal of Hazardous Materials* 172: 74–83.
45. Sottnikova, A. L., Lunackova, E., Masarovicova, A., Stresko, V., 2003. Changes in the rooting and growth of willows and poplars induced by cadmium. *Biologia Plantarum* 46: 129–134.
46. Stewart, R. R. C., Bewley, J. D., 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology* 65: 245–248.
47. Streit, B., Stumm, W., 1993. Chemical properties of metal and the processes of bioaccumulation in terrestrial plants. In: Market, B. (Ed.), Plants as Bio-monitors, Indicator for Heavy Metals in Terrestrial Environment, Chapter 2. Weinheim: VCH, pp. 29-62.
48. Tabatabaie, J., Malakuti, M. J., 2005. Preparation of Culture Medium, Feeding and Irrigation in Greenhouse Crops. Sana Publications, Tehran. (in Persian).

49. Wang, X., Shi, M., Hao, P., Zheng, W., Cao, F. 2017. Alleviation of cadmium toxicity by potassium supplementation involves various physiological and biochemical features in *Nicotiana tabacum* L. *Acta Physiologiae Plantarum* 39(6), 132.
50. Wang, X., Shi, M., Hao, P., Zheng, W., Cao, F., 2017. Alleviation of cadmium toxicity by potassium supplementation involves various physiological and biochemical features in *Nicotiana tabacum* L. *Acta Physiologiae Plantarum* 39(6): 132.
51. Wong, M.K., Chuah, G.K., Koh, L.L., Ang, K.P., Hew, C.S., 1984. The uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and its effect on plant zinc and iron distribution. *Environmental and Experimental Botany* 24: 189–195.
52. Wu, F., Zhang, G., Dominy, P., 2003. Four barley genotypes respond differently to cadmium: Lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. *Environmental and Experimental Botany* 50: 67–78.
53. Zhang, H., Jiang, Y. H. Z., Ma, M., 2005. Cadmium accumulation and oxidative burst in garlic (*Allium sativum*). *Journal of Plant Physiology* 162: 997–984.
54. Zhao, Y., 2011. Cadmium accumulation and antioxidative defenses in leaves of *Triticum aestivum* L. and *Zea* mays L. *African Journal of Biotechnology* 10: 2936–2943.
55. Zhong, Y.S., Wang, J., Liu, W.M., Zhu, Y.H., 2013. Potassium ion channels in retinal ganglion cells. *Molecular Medicine Reports* 8(2): 311–319.

Interaction Effect of Cadmium and Potassium on the Antioxidant Activity and Nutrients Concentration of Tomato

H. Seyed Hajizadeh*[1], M. Kamrani Alileh[1], F. Behtash[1] and S.B. Mousavi[2]

(Received: 7 February 2020; Accepted: 2 January 2021)

Abstract

The presence of cadmium in the soil is a major threat to plant growth and productivity. Plants often accumulate cadmium in their edible part, reducing the yield and quality of the product. In order to evaluate the effect of different concentrations of potassium (100, 200 and 300 mg L^{-1}) under different levels of cadmium (0, 2 and 4 mg L^{-1}) stress in tomatoes and potassium efficiency in reducing stress effects, a factorial experiment based on a completely randomized design was carried out with 3 replications. The results showed that with raising the cadmium concentration, malondialdehyde content, hydrogen peroxide content and guaiacol peroxidase activity were increased. The interaction effect of cadmium and potassium on the Fe concentration in the fruits and Zn concentrations in the leaves and fruits of tomatoes was not significant; however, the use of each of them alone had a significant effect; so, potassium consumption increased the concentrations of Fe, Zn and K in the fruits and decreased the malondialdehyde and hydrogen peroxide. The results of greenhouse experiments showed that the use of potassium nitrate fertilizer improved the efficiency of the plant phytoremediation in reducing the cadmium stress, although it is necessary to continue research in the field.

Keywords: Antioxidative enzyme, Iron, Protein, Heavy metal, *Lycopersicon esculentum* Mill.

Background and Objective: Cadmium is one of the heavy metals with high mobility in the environment; it is easily absorbed by plant roots and transferred to various plant organs. Potassium moves easily throughout the plant; it is present in large amounts in the active and growing parts of plants. The results of several studies have shown that the use of potassium can be effective on the cadmium content accumulating in the plant. Gülser and Sönmez (3) for instance, showed that increasing potassium in branches significantly reduced the average concentration of cadmium in them. The aim of the present study was to evaluate the efficacy of potassium in reducing the effect of cadmium in hydroponic culture and to assess the biochemical properties and concentrations of some nutrients in the tomato leaves and fruits under cadmium stress.

Methods: Cheif Super tomato seeds were obtained from BONANZA (USA) with 99% purity and 85% germination ability. Twelve liter plastic pots were used as the planting containers and sand as the planting medium. The experiment was carried out based on a factorial arrangement in complete randomized block design with three replications. Potassium was used at three levels (control K1: 100, 200 (K2) and 300 (K3) mg L^{-1} of potassium nitrate source (KNO_3). Cadmium was applied at three levels of zero (Control: Cd1), 2 (Cd2) and 4 (Cd3) mg L^{-1} of cadmium sulfate source ($3CdSO_4.8H_2O$). At the end of the experiment, the amount of biochemical parameters, such as guiacol peroxidase,

1. Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, P.O. Box 55136-553, Maragheh, Iran
2. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, P.O. Box 55136-553, Maragheh, Iran
* Corresponding Author, Email: hajizadeh@maragheh.ac.ir

malondialdehyde, protein and hydrogen peroxide, as well as some nutrients including iron, potassium, zinc and cadmium, were measured in the fruits and leaves (1, 2, 4).

Results: The highest and lowest concentrations of malondialdehyde in the fruits were 208.3 and 130.2 μmol g^{-1} in Cd3K1 and Cd1K3 treatments, respectively. Increasing potassium decreased the concentration of malondialdehyde from 142.6 μmol g^{-1} in the control (Cd1K1) to 139.6 and 130.66 μmol g^{-1} in the Cd1K2 and Cd1K3 treatments, respectively. Using potassium and cadmium in combination with the nutrient solution increased the activity of guaiacol peroxidase. Cadmium caused the production of hydrogen peroxide; this, in turn, increased the activity of antioxidant enzymes, which maintained the strength of the cell wall. By using cadmium sulfate, the average concentration of potassium in the fruits and leaves ranged from 55.50 and 33.60 mg kg^{-1} in the Cd1 treatment to 44.90, 39.03 and 27.64, 19.04 mg kg^{-1} in the Cd2 and Cd3 treatments, respectively. Potassium application also had a significant effect on the iron concentration in the fruit. Therefore, it was increased from 49.96 mg kg^{-1} in the K1 treatment to 58.21 and 66.09 mg kg^{-1} in the K2 and K3 treatments, respectively.

Conclusions: The results showed that with the application of potassium, the concentration of potassium in the fruits and leaves was increased. Using potassium and cadmium together had a significant effect on the activity of guaiacol peroxidase, malondialdehyde and hydrogen peroxide contents, reducing the harmful effects of the heavy metal; however, the absorption of iron and potassium in the fruit was only affected by using potassium. The main effects and also, the interaction of potassium and cadmium on the concentration of cadmium in the leaves and fruits were significant; this was since increasing the concentration of cadmium in the nutrient solution raised the concentration of cadmium in the leaves and fruits; however, using the combination of potassium and cadmium reduced the concentration of cadmium in the leaves and fruits of tomatoes.

References:

1. Cakmak, I., 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells damage by reactive oxygen species. *New Phytologist.* 3: 5486–5489.
2. Dong, J., Wu, F., Zhang, G., 2006. Influence of cadmium antioxidant capacity and four microelement concentration in tomato seeding (*Lycopersicon esculentum*). *Plant Physiology and Biochemistry* 64: 1659–1666.
3. Gülser, F., Sönmez, F., 2012. Cadmium effects on potassium content and pepper seedling growth in different peat ratios. *Eurasian Journal of Soil Science* 110–115.
4. Sergiv, I., Alexieva, V., Karanov, E., 1997. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Comptes Rendus De L Academie Bulgare Des Sciences, Sci* 51: 121–124.