

## اثر پتاسیم و روی در کاهش غلظت کادمیم در اندام‌های مختلف گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* L.) در کشت بدون خاک

زهرا قاسمی<sup>۱\*</sup> و علی اصغر شهابی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۲۹)

### چکیده

به منظور بررسی اثر پتاسیم و روی با کادمیم در ریشه، ساقه، برگ و میوه گیاه گوجه‌فرنگی، آزمایشی گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به اجرا در آمد. فاکتور اول سه سطح روی (۸۸/۸، ۱۷۷/۶ و ۳۵۵/۲ میکروگرم در لیتر) و فاکتور دوم سه سطح پتاسیم (۲۵۵، ۵۱۰ و ۱۰۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. در این آزمایش، محلول غذایی پایه (محلول هوگلند) در تمامی تیمارها حاوی غلظت ۲۰ میکرومولار کادمیم بود. در دوره دوم برداشت، غلظت کادمیم، پتاسیم و روی در اندام‌های مختلف گیاه شامل ریشه، ساقه، برگ و میوه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت روی در محلول غذایی تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم و پتاسیم در ریشه نداشت؛ لیکن سبب افزایش غلظت روی در ریشه گردید. در ساقه، کاربرد روی سبب افزایش غلظت کادمیم و روی شد؛ اما تأثیری بر غلظت پتاسیم نداشت. در برگ، غلظت پتاسیم و کادمیم افزایش یافت؛ لیکن تأثیری بر غلظت روی مشاهده نگردید. در میوه نیز غلظت هیچ کدام از سه عنصر روی، پتاسیم و کادمیم تحت تأثیر افزایش غلظت روی در محلول غذایی قرار نگرفت. افزایش غلظت پتاسیم در محلول غذایی تأثیر معنی‌داری بر غلظت کادمیم، روی و پتاسیم در ریشه نداشت. در ساقه، تنها غلظت روی افزایش یافت. لیکن در برگ، سبب کاهش معنی‌دار کادمیم همگام با افزایش غلظت پتاسیم شد. در میوه نیز پتاسیم تنها سبب افزایش غلظت روی گردید. اثر متقابل پتاسیم و روی تنها بر غلظت پتاسیم ریشه و غلظت روی در میوه معنی‌دار بود. به طور کلی، در شرایط آزمایش حاضر، در گیاه گوجه‌فرنگی، روی و کادمیم اثر متقابل مثبت (هم‌افزایی) و پتاسیم و کادمیم دارای اثر متقابل منفی (ضدیتی) می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: عناصر سنگین، عناصر غذایی، هم‌افزایی، اثر ضدیتی.

### مقدمه

خاک‌هایی که به طور ذاتی و طبیعی آلوده به کادمیم نیستند، مصرف مداوم و بیش از حد کودهای فسفاته حاوی مقادیر زیاد کادمیم است (۱۲). کادمیم به علت تحرک زیاد در خاک یکی از خطرناک‌ترین فلزات محسوب می‌شود. به طوری که در غلظت‌های کم نیز برگ‌پایان تأثیر منفی می‌گذارد (۱۳). کادمیم سبب اختلال در جابجایی عناصر کم‌مصرف به برگ‌ها می‌شود. همچنین

گوجه‌فرنگی یکی از سبزی‌های مهمی است که به علت داشتن انواع ویتامین‌ها، کاروتن، اسیدهای مفید، قند و املاح معدنی، نقش مهمی را در سلامت انسان ایفا می‌کند. این گیاه به شکل‌های مختلف در تغذیه مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱). کادمیم عمدتاً از فرسایش منابع طبیعی و فعالیت‌های انسانی به بیوسفر آزاد می‌شود (۸). منبع اصلی و غالب کادمیم، در

۱. دانشگاه پیام نور، واحد نجف آباد

۲. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zaghasemi115@yahoo.com

دارند. به علت خواص مشابه روی و کادمیم، کادمیم می‌تواند به سادگی بسیاری از فرایندهای وابسته به روی را از طریق رقابت بر سر جایگاه‌های مشابه یا واکنش‌های جایگزینی - جانشینی در اشغال جایگاه‌های فعال متالوپروتئین‌های روی ممانعت کند (۶). کاهش غلظت کادمیم در برگ‌های تربچه با اضافه کردن روی مشاهده شده است. همچنین ول و همکاران (۱۹) گزارش کردند که روی، سطح کادمیم را در برگ‌های گیاه کاهو که در غلظت ۲ میکرومولار قرار داشتند، کاهش داد. مطالعات در مورد اثر متقابل کادمیم و روی نقش ضدیتی روی را در سمیت کادمیم به وضوح مشخص کرده است. نشانه‌های سمیت شامل سبز زردی و بافت مردگی که در شرایط فزونی کادمیم مشاهده می‌شود، به طور واضحی توسط روی کاهش می‌یابد (۶). به طور کلی، محققین نشان داده‌اند که اثر روی بر جذب کادمیم در گیاه ممکن است به گونه گیاهی، بافت گیاه و سطوح روی و کادمیم محیط وابسته باشد (۱۴). برهمکنش بین کادمیم و دیگر عناصر ممکن است مکانیسم‌های انتقال مشابه داشته باشد. کاتالدو و همکاران (۹) کاهش جذب کادمیم توسط ریشه و انتقال آن به بخش هوایی را توسط مس، آهن، منگنز و روی در نهال‌های سویا گزارش کردند. با توجه به برهمکنش بین عناصر در گیاهان مختلف و همچنین تحقیق قاسمی و شهابی (۳) در خصوص تأثیر کادمیم بر پارامترهای رویشی و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های مختلف گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط کشت بدون خاک، که طی آن مشخص گردید افزایش غلظت کادمیم در محیط ریشه در حد ۲۰ میکرومولار سبب افزایش جذب و غلظت این عنصر در ریشه، ساقه و برگ شده و آثار سوء ناشی از این انباشتگی بر پارامترهای رویشی و کاهش رشد گیاه، تحقیق حاضر با هدف مطالعه اثرهای اصلی و متقابل پتاسیم و روی بر کاهش غلظت کادمیم در گیاه گوجه‌فرنگی صورت گرفته است.

### مواد و روش‌ها

این مطالعه در تابستان سال ۱۳۸۷ در محل گلخانه مرکز تحقیقات

تحقیقات نشان داده که غلظت عناصر پرمصرف در حضور کادمیم به شدت در برگ‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که محتوای کاتیون‌های چندظرفیتی می‌تواند با حضور کادمیم طی فرایندهای رقابتی از طریق رقابت بر سر جایگاه‌های پیوندی یا توسط ناقلین تحت تأثیر قرار گیرد. تجمع پتاسیم نیز می‌تواند از طریق تغییر در فعالیت  $ATP_{ase}$  یا فریک ردوکتاز تحت تأثیر قرار گیرد. این موضوع در برنج و نخود بررسی شده است (۱۷).

پتاسیم در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه نه تنها از نظر مقدار موجود در بافت‌های گیاهی، بلکه از نظر وظایف فیزیولوژیک و شیمیایی مهمترین کاتیون است (۲). پتاسیم به صورت کاتیون و به مقدار زیاد، به طور سریع جذب شده و انتقال آن در داخل گیاه نیز سریع می‌باشد (۲). اگر چه پتاسیم در گیاه نقش ساختمانی ندارد، اما فعال کننده بیش از ۶۰ نوع آنزیم در گیاه است. این احتمال وجود دارد که در اثر وجود غلظت زیاد و سمی کادمیم در محیط ریشه و در نتیجه جذب آن توسط ریشه، در سازوکار متابولیسمی گیاه ایجاد اختلال شود. یکی از این اختلالات مربوط به کاهش تأثیرپذیری آنزیم‌ها از پتاسیم در شرایط معمول غلظت این عنصر در محیط و در داخل گیاه است. لذا به این دلیل، بررسی تأثیر غلظت‌های بیشتر از حد معمول پتاسیم جهت کاهش اثرهای منفی کادمیم در حالتی که غلظت این عنصر در محیط در حد سمیت است قابل توجه می‌باشد (۴).

از طرف دیگر، عنصر روی بعد از آهن فراوان‌ترین عنصر در موجودات زنده می‌باشد (۷). روی از محلول خاک به صورت  $Zn^{2+}$  یا  $Zn(OH)_2$  در پ-هاش زیاد جذب می‌شود و جذب آن توسط پروتئین ناقل غشا صورت می‌گیرد. روی در داخل گیاه به صورت  $Zn^{2+}$  یا به صورت ترکیب با اسیدهای آلی انتقال داده می‌شود. این عنصر در بافت‌های ریشه تجمع یافته و در صورت نیاز به بخش هوایی منتقل می‌شود (۵).

کادمیم و روی ساختار الکترونی و ظرفیت مشابه داشته و بنابراین تمایلات مساوی برای لیگاندهای سولفور، نیتروژن و اکسیژن دارند. از این رو، خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی

براساس روش‌های استاندارد و معمول (۱۶)، پس از آماده سازی نمونه‌های گیاهی، غلظت پتاسیم توسط دستگاه نورسنج شعله‌ای (Flame emission spectrometer) و غلظت عناصر روی و کادمیم توسط دستگاه جذب اتمی شعله‌ای تعیین شد. سپس به کمک نرم افزار SAS تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ انجام شد و نمودارها نیز توسط نرم‌افزار اکسل رسم گردید.

### نتایج

#### اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت عناصر در برگ

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت عناصر غذایی برگ در جدول ۱ آمده است. نتایج نشان داد که با مصرف روی، غلظت کادمیم برگ به طور معنی‌داری در سطح ۱٪ افزایش یافت. کمترین میانگین غلظت کادمیم مربوط به تیمار Zn1 (۸۹/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بیشترین آن مربوط به تیمارهای Zn2 و Zn3 (به ترتیب ۱۰۳/۳۱ و ۱۰۳/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (شکل ۱). ولی مصرف روی بر غلظت روی و پتاسیم برگ اثر معنی‌دار نداشت. کاربرد پتاسیم تأثیر معنی‌داری بر غلظت روی، پتاسیم و کادمیم برگ داشت. به طوری که بیشترین غلظت روی در تیمار K2 مشاهده شد. غلظت پتاسیم نیز با افزایش سطح پتاسیم نسبت به سطح اول افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت. از طرفی، غلظت کادمیم برگ از ۱۰۴/۲۹ به ۸۷/۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت (شکل ۲). اثر متقابل پتاسیم و روی بر غلظت عناصر اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود (جدول ۱).

#### اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت عناصر ساقه

همانگونه که داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد از بین تیمارهای آزمایش، تنها تیمار روی بر غلظت روی و کادمیم ساقه در سطح ۱٪ اثر معنی‌دار داشت. کاربرد روی باعث افزایش غلظت این عنصر در ساقه شد. همچنین افزایش غلظت روی تأثیر

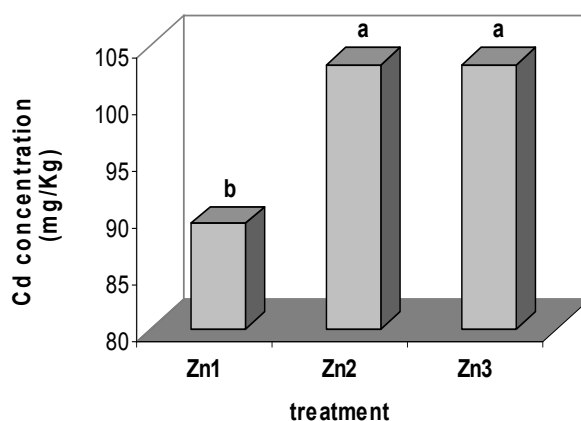
کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان روی گیاه گوجه‌فرنگی صورت گرفت. برای کاشت گوجه‌فرنگی از بذر رقم نورا (Nora) به عنوان یکی از ارقام تجاری داربستی مرسوم و مورد کاشت در گلخانه‌های تجاری استان اصفهان استفاده شد. بذرها ابتدا در ظرف نشا محتوی پیت ماس کشت شده و در شرایط گلخانه‌ای قرار گرفتند. پس از طی ۲۲ روز، با آبیاری منظم و در شرایط کنترل شده، نشاهای سه برگی آماده انتقال به گلدان‌های حاوی پرلیت در سیستم هیدروپونیک برای آزمایش‌های اصلی شدند. در این روش، محلول غذایی تیمار شده به روش آبیاری قطره‌ای طی ۳ تا ۶ نوبت در شبانه‌روز (بسته به مراحل رشد) توسط تایمر تنظیم و به گلدان‌ها اضافه می‌گردید. این آزمایش در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی و به صورت فاکتوریل به اجرا در آمد. فاکتور اول شامل تیمار روی در سه سطح (۸/۸۷، Zn1= ۱۷۷/۶ و Zn2= ۳۵۵/۲ میکروگرم در لیتر) و تیمار پتاسیم در سه سطح (K1=۲۵۵، K2= ۵۱۰ و K3= ۱۰۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. سطح اول روی به میزان ۸۷/۸ میکروگرم در لیتر و سطح اول پتاسیم به میزان ۲۵۵ میلی‌گرم در لیتر همان غلظت‌های پایه در محلول غذایی هوگلدن و سطوح دوم و سوم هر یک از این عناصر به ترتیب دو و چهار برابر غلظت پایه است. در این آزمایش، به محلول غذایی در تمام تیمارها ۲۰ میکرومولار کادمیم اضافه شد. برای تهیه تیمار کادمیم، روی و پتاسیم به ترتیب از نمک کلرید کادمیم ( $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ )، نمک سولفات روی ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) و نمک سولفات پتاسیم ( $K_2SO_4$ ) استفاده شد. برای تیمار کادمیم، ۶۰ میلی‌لیتر از محلول ۰/۰۲ مولار کادمیم، برای تیمارهای Zn2 و Zn3 به ترتیب ۲۵ و ۵۰ میلی‌لیتر از محلول ۰/۰۱ مولار  $ZnSO_4$  و برای تیمارهای K2 و K3 به ترتیب ۶۸ و ۱۳۶ میلی‌لیتر از محلول ۰/۵ مولار  $K_2SO_4$  به ۶۰ لیتر محلول غذایی در هر مرحله ساخت محلول غذایی اضافه شد.

در مرحله میوه‌دهی (مرحله دوم برداشت)، نمونه‌های گیاهی از قسمت‌های مختلف گیاه شامل ریشه، ساقه، برگ و میوه تهیه شد. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر پتاسیم، روی و کادمیم

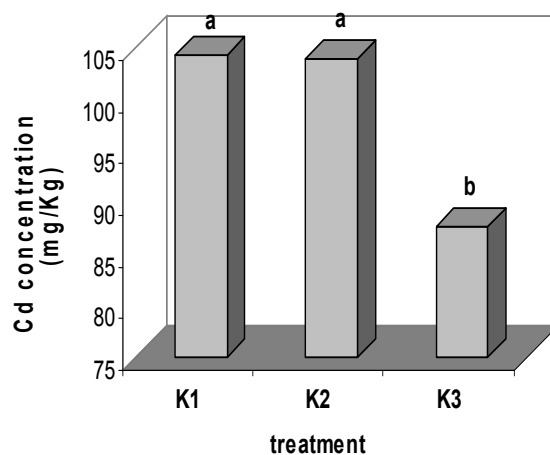
جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت پتاسیم، روی و کادمیم در برگ

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
Cd	K	Zn		
۱۲۱/۱۷ <sup>ns</sup>	۰/۱۹ <sup>ns</sup>	۱۸۸/۹۸ <sup>ns</sup>	۲	بلوک
۵۸۹/۴۱ <sup>**</sup>	۱/۳۶ <sup>ns</sup>	۶۰/۶۴ <sup>ns</sup>	۲	Zn
۸۱۳/۷۷ <sup>**</sup>	۴/۸۷ <sup>**</sup>	۵۱۸/۲۵ <sup>*</sup>	۲	K
۱۰۵/۹۰ <sup>ns</sup>	۰/۳۹ <sup>ns</sup>	۵۰/۳۵ <sup>ns</sup>	۴	Zn×K
۸۵/۸۱	۰/۴۱	۱۰۳/۷۶	۱۶	خطا
۲۳/۳۹	۱۰/۵۷	۲۵/۶۰		ضریب تغییرات (%)

ns و \*، \*\* به ترتیب معنی دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و عدم تفاوت معنی دار بر اساس آزمون دانکن



شکل ۱. اثر تیمار روی بر غلظت کادمیم برگ



شکل ۲. اثر تیمار پتاسیم بر غلظت کادمیم برگ

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت پتاسیم، روی و کادمیم در ساقه

میانگین مربعات			درجه	منابع تغییر
Cd	Zn	K	آزادی	
۰/۲۸ <sup>ns</sup>	۷۷/۰۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۹ <sup>ns</sup>	۲	بلوک
۸۸۱/۹۹ <sup>**</sup>	۱۷۵۷/۲۷ <sup>**</sup>	۱/۱۰ <sup>ns</sup>	۲	Zn
۴۱/۰۳ <sup>ns</sup>	۱۹۳/۶۱ <sup>ns</sup>	۱/۱۷ <sup>ns</sup>	۲	K
۵۶/۸۸ <sup>ns</sup>	۷۷/۳۰ <sup>ns</sup>	۱/۱۷ <sup>ns</sup>	۴	Zn×K
۵۸/۶۴	۷۲/۷۳	۰/۹۴	۱۶	خطا
۲۲/۳۹	۲۵/۶۰	۱۸/۱۲		ضریب تغییرات (%)

\*\* و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح ۱٪ و عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای روی بر غلظت پتاسیم، روی و کادمیم در ساقه\*

K (%)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	غلظت روی
۴/۹۵a	۱۸/۵۳c	۲۱/۸۰b	Zn <sub>1</sub>
۵/۴۷a	۳۵/۰۸b	۳۵/۱a	Zn <sub>2</sub>
۵/۶۱a	۴۶/۳۱a	۴۱/۰۹a	Zn <sub>3</sub>

\* در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ می‌باشند.

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد روی، غلظت این عنصر در ریشه به طور قابل توجهی افزایش یافت (جدول ۵). کاربرد سطوح مختلف پتاسیم بر غلظت کادمیم، روی و پتاسیم ریشه معنی‌دار نبود. با این وجود، اثر متقابل روی و پتاسیم فقط بر غلظت پتاسیم تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۴).

#### اثر تیمارهای آزمایش بر عناصر میوه

در میوه، اثر تیمار پتاسیم بر غلظت روی در سطح ۵٪ معنی‌دار بود. به طوری که بیشترین غلظت روی (۳۲/۱۳٪) در سطح K1 مشاهده شد. اثر متقابل پتاسیم و روی نیز در سطح ۱٪ بر غلظت روی معنی‌دار شد. در کلیه تیمارها، غلظت کادمیم میوه در حد تشخیص دستگاه نبود (جدول ۶).

افزایشی بر غلظت کادمیم ساقه داشت. غلظت کادمیم در سطح اول روی ۲۱/۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. با افزایش غلظت روی، افزایش معنی‌داری در غلظت کادمیم ساقه مشاهده شد. به طوری که بیشترین تجمع کادمیم در ساقه در سطوح دوم و سوم روی و برابر با ۳۵/۱ و ۴۱/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۳). تیمار پتاسیم و اثر متقابل آن با روی بر غلظت عناصر اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود (جدول ۲).

#### اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت عناصر ریشه

چنانکه داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد کاربرد سطوح مختلف روی تنها بر غلظت روی در ریشه در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. لیکن بر غلظت کادمیم و پتاسیم ریشه اثر معنی‌دار نداشت.

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در ریشه

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
Cd	Zn	K		
۴۵۰۵۲/۹ns	۱۰۸۲/۸ns	۰/۲ns	۲	بلوک
۵۰۶۶۱/۰ns	۲۱۸۰۸/۱**	۲/۳ns	۲	Zn
۱۰۴۷۰۲/۸ns	۲۴۴/۹ns	۱/۶ns	۲	K
۶۲۳۲۴/۰ns	۱۲۳۱/۸ns	۷/۵**	۴	Zn×K
۴۸۷۱۹/۱	۶۵۴/۲	۰/۶	۱۶	خطا
۲۷/۴۵	۲۲/۶۵	۱۵/۶۹		CV(%)

ns و \*، \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن

جدول ۵. نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای روی بر غلظت پتاسیم، روی و کادمیم در ریشه

K (%)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	غلظت روی
۵/۸۴a	۷۰/۶۴c	۸۰/۵a	Zn <sub>1</sub>
۴/۹۰b	۱۰۱/۱۲b	۸۸۰/۰a	Zn <sub>2</sub>
۵/۰۷ab	۱۶۶/۹۶a	۷۳۰/۰a	Zn <sub>3</sub>

در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ می‌باشند.

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در میوه

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
Cd	Zn	K		
-	۱۳۳/۳۶ <sup>ns</sup>	۰/۱۳ <sup>ns</sup>	۲	بلوک
-	۱۱۰/۹۴ <sup>ns</sup>	۰/۶۸ <sup>ns</sup>	۲	Zn
-	۳۲۷/۳۴ <sup>**</sup>	۰/۵۳ <sup>ns</sup>	۲	K
-	۱۹۸/۹۴ <sup>*</sup>	۰/۳۱ <sup>ns</sup>	۴	Zn×K
-	۵۶/۴۵	۰/۲۵	۱۶	خطا
-	۲۹/۵۲	۱۲/۴۸		ضریب تغییرات (%)

ns و \*، \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪ و عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن

## بحث

### برهمکنش کادمیم و روی

بخش‌های مختلف گیاه گوجه‌فرنگی مشخص شد که افزایش غلظت روی در محیط ریشه نسبت به حالت پایه تأثیری بر جذب کادمیم در ریشه ندارد. اما در بخش هوایی (ساقه و

با بررسی اثر سطوح مختلف روی بر غلظت کادمیم در

### برهمکنش پتاسیم و کادمیم

نتایج نشان داد که کاربرد پتاسیم باعث کاهش تجمع کادمیم در تمام بخش‌های گیاه (ریشه، ساقه و برگ) شده است. هرچند این کاهش در ریشه و ساقه به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. با این وجود، افزایش غلظت پتاسیم به طور معنی‌داری باعث کاهش تجمع کادمیم در برگ‌ها شد. چنین مشخص شده که افزایش غلظت پتاسیم در گیاه می‌تواند به طور شگرفی تولید گونه‌های فعال اکسیژنی (ROS) را از طریق کاهش فعالیت NADPH اکسیداز و نگهداری انتقال الکترون فتوسنتزی مهار کند. به نظر می‌رسد وجود غلظت زیاد پتاسیم اثر منفی کادمیم بر فعالیت‌های فوق در غلظت معمول پتاسیم را کاهش دهد. اثر ضدیتی مشاهده شده در این آزمایش بین پتاسیم و کادمیم با نتایج مطالعات یومار و همکاران (۱۸) مطابقت دارد. آنان نشان دادند که اضافه کردن کادمیم به خاک باعث افزایش غلظت کادمیم در برگ‌های گیاه خردل شده است و تفاوت قابل توجهی در میزان کادمیم در گیاهان رشد یافته در غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک دیده شد. با کاربرد پتاسیم در این خاک‌ها به میزان ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، غلظت کادمیم برگ به طور چشمگیری کاهش یافت، که حاکی از تأثیر ضدیتی پتاسیم بر جذب کادمیم توسط گیاه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

به طور کلی، نتایج نشان داد که کاربرد روی به منظور کاهش اثر آلاینده کادمیم در گیاه گوجه‌فرنگی، به علت اثر هم‌افزایی روی و کادمیم، نه تنها سبب کاهش غلظت کادمیم در بخش هوایی نشد، بلکه باعث افزایش کادمیم در این بخش شده و اثر سمیت آن با کاهش پارامترهای رشد نیز بروز نموده است. همچنین، کاربرد پتاسیم باعث کاهش تجمع کادمیم در ریشه، ساقه و برگ شد. هرچند این کاهش در ریشه و ساقه معنی‌دار نبود، اما افزایش غلظت پتاسیم به طور معنی‌داری باعث کاهش تجمع کادمیم در برگ‌ها شد.

برگ)، غلظت کادمیم همگام با افزایش سطح روی در محلول غذایی افزایش چشمگیری را نشان داد. در واقع، نتایج این آزمایش گویای این مطلب است که کادمیم و روی در گیاه گوجه‌فرنگی اثر هم‌افزایی داشته و افزایش غلظت روی سبب افزایش غلظت کادمیم در بخش هوایی گیاه شده است.

در مورد اثر سطوح مختلف روی بر غلظت کادمیم در گیاه نتایج ضد و نقیضی وجود دارد. بسیاری از محققین نشان داده‌اند که اضافه کردن روی به خاک، غلظت کادمیم را در محصولات کاهش می‌دهد (۹ و ۱۰). اما عده‌ای دیگر گزارش کرده‌اند که جذب کادمیم با اضافه کردن روی به خاک افزایش می‌یابد (۱۵). اما چوی و همکاران (۱۱) هیچ اثر کنشی بین روی و کادمیم در میزان جذب در گیاه نخود مشاهده نکردند.

محققین همچنین نشان داده‌اند که تأثیر ضدیتی روی به طور قوی بر غلظت کادمیم در برگ‌های جوان اسفناج در غلظت‌های کم کادمیم رخ می‌دهد. این محققین همچنین بیان داشتند که اثر روی بر جذب کادمیم در گیاه ممکن است وابسته به گونه گیاهی، بافت گیاه و سطوح روی و کادمیم محیط باشد (۱۴). حسن و همکاران (۱۳) طی مطالعه‌ای در خصوص اثر کادمیم و روی در برنج مشاهده کردند که تأثیر روی بر کادمیم در اندام‌های مختلف گیاه متفاوت است. به طوری که در غلظت‌های زیاد روی، افزایش میزان روی باعث افزایش قابل توجه میزان کادمیم در بخش هوایی شد. در حالی که عنصر روی، غلظت کادمیم ریشه‌ها را کاهش داد. مشخص شده که جابجایی فلزات در گیاه به تولید فیتوکلاتین‌ها بستگی دارد. به نظر می‌رسد تولید فیتوکلاتین به شدت در غلظت‌های زیاد کادمیم تحریک شده و کمپلکس کادمیم- فیتوکلاتین در واکوئل سلول‌های ریشه تجمع یافته و از این طریق جابجایی کادمیم کاهش می‌یابد. اضافه کردن روی برای تشکیل کمپلکس رقابت می‌کند و بنابراین مقدار کادمیم آزاد افزایش یافته و به دنبال آن باعث افزایش جابجایی کادمیم از ریشه به بخش هوایی می‌گردد (۱۳).

## منابع مورد استفاده

۱. پیوست، غ. ۱۳۸۰. سبزیکاری. نشر علوم کشاورزی، تهران، ۵۰۳.
۲. ثواقبی، غ. و م. ج. ملکوتی. ۱۳۷۹. اثرات برهمکنش کادمیم و پتاسیم بر تولید ماده خشک، غلظت و جذب کادمیم و پتاسیم در گندم. مجله خاک و آب ۱۲(۹): ۴۴-۵۳.
۳. قاسمی، ز. و ع. ا. شهابی. ۱۳۸۹. تأثیر کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژیک، صفات رویشی و غلظت عناصر غذایی در گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط کشت بدون خاک. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱(۲): ۵۵-۶۶.
۴. ملکوتی، م. ج. ع. ا. شهابی و ک. بازرگان. ۱۳۸۴. پتاسیم در کشاورزی ایران. انتشارات سنا، تهران، صفحات ۱۰۸-۱۱۰.
5. Allowey, B.J. 2004. Zinc in soil and crop nutrition. <http://www.zincworld.org>.
6. Aravinad, P., M. Narasimha and V. Prasad. 2005. Cadmium-zinc interactions in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: Adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Braz. J. Plant Physiol.* 17(1): 3-20.
7. Broadley, M.R., P.J. White, J.P. Hammond, I. Zelko and A. Lux. 2007. Zinc in plants: Review. *New Phytologist* 173: 677-702.
8. Benavides, M.P., S.M. Gallego and M.L. Tomaro. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17(1): 21-34.
9. Cataldo, D.A., T.R. Garland and R.E. Wildung. 1983. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. *Plant Physiol.* 73: 844-848.
10. Choudhary, M., L.D. Bailey, C.A. Grant and D. Leisle. 1994. Effect of Zn on the concentration of Cd and Zn in plant tissue of two durum wheat lines. *Can. J. Plant Sci.* 75(2): 445-448.
11. Chaoui, A., M.H. Ghorbal and E. El-Ferjani. 1997. Effects of cadmium-zinc interaction on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Sci.* 126: 21-28.
12. Ehn, C. 2003. Cadmium review. *Nordic Council of Ministers* 1(4): 2-22.
13. Hassan, M.J., G. Zhang, F. Wu, K. Wei and Z. Chen. 2005. Zinc alleviates growth inhibition and oxidative stress caused by cadmium in rice. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 255-261.
14. Mckenna, I., R.L. Chaney and F.M. Williams. 1991. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach. *Environ. Pollution* 79: 113-120.
15. Moraghan, J.T. 1993. Accumulation of cadmium and selected elements in flax seed grown on a calcareous soil. *Plant Soil* 150: 61-68.
16. Page, A.L., R.H. Miller and H. Keeney. 1992. *Methods of Soil Analysis. Part 2*, American Society of Agronomy, Madison, WI.
17. Sandalio, L.M., H.C. Dalurzo, M. Gomez, M.C. Romero-Puertas and L.A. del-Rio. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *J. Exp. Bot.* 52(364): 2115-2126.
18. Umar, S., I. Diva, N.A. Anjum and M. Iqbal. 2008. Potassium nutrition reduces cadmium accumulation and oxidative burst in mustard (*Brassica campestris* L.). *Elect. Intl. Fert. Correspondent* 16: 6-10.
19. Welch, R.M., W.A. House and D.R. Van Campen. 1978. Availability of cadmium from lettuce leaves and cadmium sulfate to rats. *Nutr. Rep. Intl.* 17: 35-42.