بررسی تأثیر پتاسیم و روی بر شاخص‌های فیزیولوژیک و صفات رویشی گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش کادمیم در کشت بدون خاک

زهرا قاسمی[۱] و علی اصغر شهابی[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۸/۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۶)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر پتاسیم و روی بر کاهش اثرات نامطلوب کادمیم بر صفات رویشی و شاخص‌های فیزیولوژیک گیاه گوجه-فرنگی، آزمایشی گلخانه‌ای در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به صورت فاکتوریل به اجرا درآمد. فاکتور اول شامل سه سطح روی با غلظت‌های ۸۸/۸، ۱۷۷/۶ و ۳۵۵/۲ میکروگرم در لیتر و فاکتور دوم سه سطح پتاسیم با غلظت‌های 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. نتایج نشان داد که تیمار روی اثر معنی‌دار بر برخی از شاخص‌های رشد شامل میزان رشد نسبی (RGR)، شدت رشد نسبی برگ (RLGR)، نسبت وزن برگی (LWR)، محتوای آب در واحد سطح برگ (LWCA)، وزن خشک اندام هوایی و میزان قند محلول گیاه داشته است. به طوری‌که افزایش روی سبب کاهش RGR، RLGR، LWR، LWCA و قندهای محلول به ترتیب به میزان ۷/۷، ۷/۷، ۳/۳، ۴ و ۳۱/۳ درصد شد. از طرفی، تیمار پتاسیم باعث اثر معنی‌دار بر نسبت سطح برگ (LAR)، سطح ویژه برگی (SLA)، نسبت وزن برگی (LWR)، محتوای آب در واحد سطح برگ (LWCA)، میزان ماده سازی خالص (NAR) و وزن تر ریشه شد. به طوری‌که سبب افزایش LAR، SLA و LWR به ترتیب به میزان ۷/۷، ۱۵/۳ و ۶/۹ درصد شد. به طور کلی، در این آزمایش مشخص شد که روی و کادمیم در گیاه گوجه‌فرنگی اثر متقابل مثبت (سینرجیسمی) داشته و به این ترتیب وجود غلظت بالا و همزمان هر دو در محیط ریشه باعث کاهش رشد و پایین آمدن میزان قندهای محلول گیاه شده است، ولی کاربرد پتاسیم و وجود غلظت بالای آن در محیط ریشه در حضور کادمیم سبب افزایش نسبت سطح برگ و سطح ویژه برگی شده و به این ترتیب با کادمیم اثر متقابل منفی (آنتاگونیستی) داشته است. اثر متقابل پتاسیم و روی تأثیری خاص و با روندی مشخص بر پارامترهای مورد اندازه‌گیری نداشته است.

واژه‌های کلیدی: عناصر سنگین، عناصر غذایی، گوجه‌فرنگی، شاخص‌های فیزیولوژیک، رشد

مقدمه

عناصر سنگین از عمده‌ترین آلاینده‌های محیطی محسوب می‌شوند که سمیت آنها به دلایل اکولوژیک، تکاملی، تغذیه‌ای و محیطی مشکل بزرگی به شمار می‌رود. شکل شیمیایی عناصر سنگین در محلول خاک به میزان عناصر، pH خاک و حضور یون‌های دیگر بستگی دارد (۶). کادمیم ازجمله عناصر سنگین و غیر ضروری برای گیاه است که بر رشد و نمو گیاهان اثر منفی دارد. این عنصر به علت سمیت و تحرک زیاد، یک آلاینده

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم گیاهی دانشگاه پیام نور واحد نجف آباد

۲. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان

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

Archive of SID

www.SID.ir

اساسی به شمار می‌رود (۶). عوامل مهمی در جذب کادمیم توسط گیاهان تأثیر دارند، که از آن جمله می‌توان به غلظت کادمیم خاک و میزان در دسترس بودن آن، تغییر شکل درحضور مواد آلی دیگر، pH خاک، پتانسیل احیاکنندگی، دما و غلظت فلزات دیگر اشاره نمود. یون آزاد کادمیم به شکل Cd^{++} بیشترین شکل کادمیم قابل جذب گیاه است (۶).

عناصر غذایی در جذب، انتقال و متابولیسم با یکدیگر برهمکنش دارند. به طوری‌که اگر غلظت برخی از عناصر در محیط زیاد باشد از جذب برخی از عناصر دیگر جلوگیری می‌کنند. این پدیده، بازدارندگی یا آنتاگونیسم نام دارد (۲). به علت خواص شیمیایی مشابه کادمیم و روی، جذب و انتقال این دو عنصر در داخل گیاه ممکن است از مسیرهای مشابهی صورت گیرد (۱۰). این فرضیه وجود دارد که عناصری که دارای خواص شیمیایی و فیزیکی مشابهی هستند به طور آنتاگونیستی عمل می‌کنند (۵). برخی از محققین نشان دادند که اضافه کردن روی به خاک، غلظت کادمیم را در محصولات کاهش می‌دهد (۹). اما عده‌ای دیگر گزارش کرده‌اند که با اضافه کردن روی به خاک، جذب کادمیم افزایش می‌یابد (۱۶). چویی و همکاران (۸) هیچ اثر آنتاگونیستی بین روی و کادمیم مشاهده نکردند. در حالی‌که برخی دیگر از محققین گزارش کردند که کادمیم و روی اثر سینرجیسمی دارند (۱۴و ۱۹). بر طبق نظر چودهری و همکاران (۱۷) کاربرد روی، جذب کادمیم و تجمع آن را در دانه گندم کاهش می‌دهد. در حالی که در برخی مطالعات هیچ ارتباطی بین آنها یافت نشده است. برهمکنش بین کادمیم و دیگر عناصر ممکن است اشاره به حضور مکانیسم‌های انتقال مشابه داشته باشد (۱۰).

پتاسیم، کاتیونی یک ظرفیتی است که جذب آن بسیار انتخابی و با فعالیت‌های سوخت و سازی در گیاه همبستگی نزدیک دارد (۴). از ویژگی‌های بارز آن تحرک زیاد در همهٔ سطوح گیاه نظیر درون سلول‌ها، درون بافت‌ها و نیز جا بجایی در مسیر طولانی از طریق آوندهای چوبی و آبکشی است (۴). کاربرد پتاسیم می‌تواند بر محتوای کادمیم گیاه تأثیر داشته باشد (۱۰). احتمالاً غلظت زیاد و سمی کادمیم در محیط ریشه و در نتیجه جذب آن توسط گیاه و ایجاد اختلال در ساز و کار متابولیسمی گیاه، باعث کاهش تأثیرپذیری آنزیم‌ها از پتاسیم می‌گردد (۴). لذا به این دلیل وجود غلظت‌های بالاتر از حد معمول پتاسیم جهت کاهش تأثیر منفی کادمیم در حالتی که غلظت این عنصر در محیط در حد سمیت است قابل توجیه می‌باشد.

این پژوهش با استناد به تحقیق انجام شده توسط قاسمی و همکاران (۳) در خصوص بررسی تأثیر کادمیم بر شاخص‌های رویشی و صفات فیزیولوژیک گوجه‌فرنگی صورت گرفت، که در آن غلظت سمی کادمیم در محیط ریشه در حد ۲۰ میکرومولار باعث تأثیر منفی بر شاخص‌های فیزیولوژیک و کاهش رشد و زیست‌توده گوجه‌فرنگی گردید.

با عنایت به آنچه گفته شد و با توجه به متفاوت بودن رفتار متقابل مثبت و منفی عناصر در بین گیاهان مختلف، این پژوهش با هدف بررسی اثر اصلی و توأم پتاسیم و روی بر کاهش آثار سمیت کادمیم بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه‌ای و در محیط پرلیت طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در محل گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان در مورد گیاه گوجه‌فرنگی رقم نورا (NORA) طی یک دوره رویشی و زایشی به مدت ۶۰ روز انجام گرفت. بذرهای گوجه‌فرنگی ابتدا در ظرف نشا (استریل شده با آب ژاول و قارچ کش) محتوی پیت ماس کشت شده و در شرایط گلخانه‌ای قرار گرفتند. پس از طی ۲۲ روز با آبیاری منظم و تنظیم شرایط گلخانه در دمای ۳۰-۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۵۰-۳۰ درصد، نشاهای سه برگی آماده انتقال به گلدان‌های حاوی پرلیت (سه کیلویی) در سیستم هیدروپونیک برای آزمایش‌های اصلی شدند. این آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به اجرا درآمد. در این روش، محلول غذایی تیمار شده به روش آبیاری قطره‌ای طی ۳ تا ۶ نوبت در شبانه روز (بسته به مراحل

www.SID.ir

رشد) توسط تایمر تنظیم و به گلدان‌ها اضافه می‌گردید. محلول اضافی از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در کف گلدان‌ها به محیط خارج هدایت می‌شد. فاکتور اول شامل تیمار روی در سه سطح Zn_1 = ۸۸/۸، Zn_2 =۱۷۷/۶ و Zn_3= ۳۵۵/۲ میکروگرم در لیتر و تیمار پتاسیم در سه سطح K_1=۲۵۵، K_2 = ۵۱۰ و K_3 =۱۰۲۰ میلی‌گرم در لیتر بود. سطح اول روی به میزان ۸۸/۸ میکروگرم در لیتر و سطح اول پتاسیم به میزان ۲۵۵ میلی‌گرم در لیتر همان غلظت‌های پایه در محلول غذایی هوگلند 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، کادمیم با غلظت ۲۰ میکرومولار اضافه شد. برای تهیه تیمار کادمیم، روی و پتاسیم از کلرور کادمیم ($CdCl_2.2.5H_2O$)، سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$) و سولفات پتاسیم (K_2SO_4) استفاده شد. در این تحقیق تیمار حاوی۲۰ میکرومولار کادمیم و سطوح اول روی و پتاسیم که همان غلظت پایه این دو عنصر در محلول غذایی است به عنوان شاهد در نظر گرفته شده است. جهت سنجش کمی رشد در گیاهان کشت شده تحت تیمارها و مقایسه آنها با یکدیگر، شاخص‌های رشدشامل میزان رشد نسبی (RGR)، میزان ماده سازی خالص (NAR)، شدت رشد نسبی برگ (RLGR)، نسبت سطح برگ (LAR)، سطح ویژه برگی (SLA)، نسبت وزن برگی (LWR)، محتوای آب در واحد سطح برگ (LWCA) و طول ساقه (SL) و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه اندازه‌گیری گردید. بدین منظور، وزن تر برگ، ساقه، ریشه و سطح برگ‌ها و وزن خشک برگ، ساقه و ریشه در دو زمان (دو مرحله) قبل از تیماردهی، در مرحله سه برگی (t_1) و بعد از تیماردهی و پس از گذراندن دوره رویشی و انجام یک دورهٔ میوه‌دهی (t_2) اندازه‌گیری شد. سپس با داشتن این اطلاعات، شاخص‌های رشد محاسبه شدند (۱):

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \qquad [1]$$

که ln لگاریتم طبیعی، W_2 وزن خشک اندام مورد نظر گیاه (گرم) در زمان t_2 و W_1 وزن خشک همان اندام مورد نظر گیاه (گرم) در زمان t_1 و$(t_2 - t_1)$ طول زمان رویش (روز) می‌باشد و بنابراین واحد RGR به صورت $gg^{-1}d^{-1}$ معرفی می‌شود.

$$NAR = \frac{W_2 - W_1}{L_2 - L_1} \times \frac{\ln L_2 - \ln L_1}{t_2 - t_1} \qquad [2]$$

در این رابطه، L_2 سطح برگ در زمان t_2 و L_1 سطح برگ در زمان t_1 می‌باشد. به طور معمول، NAR بر حسب گرم بر مترمربع در روز معرفی می‌شود.

$$RLGR = \frac{\ln L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \qquad [3]$$

RLGR بر حسب $cm^2cm^{-2}d^{-1}$ می‌باشد.

$$LAR = \frac{(L_2 - L_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(W_2 - W_1)(\ln L_2 - \ln L_1)} \qquad [4]$$

LAR برحسب m^2g^{-1} وزن خشک بیان می‌شود که در آن L سطح برگ و W وزن خشک است.

$$SLA = \frac{L}{LDW} \qquad [5]$$

L سطح برگ و LDW وزن خشک برگ است و SLA بر حسب cm^2g^{-1} معرفی می‌شود.

$$LWR = \frac{LDW}{W} \qquad [6]$$

LWR بر حسب gg^{-1} وزن خشک معرفی می‌شود.

$$LWCA = \frac{LFW - LDW}{L} \qquad [7]$$

در این رابطه، LFW وزن تر برگ، LDW وزن خشک برگ و L سطح برگ است. LWCA برحسب گرم بر متر مربع معرفی می‌شود.

همچنین شاخص‌های فیزیولوژیک شامل سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید به روش لیچتن تالر و اندازه‌گیری قندهای محلول و نامحلول به روش کوچرت انجام شد (۱۲ و ۱۳). در پایان، داده‌های به دست آمده از این آزمایش توسط نرم‌افزار MSTAT-C و آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت و رسم نمودارها توسط نرم افزار EXCEL صورت گرفت.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های رویشی در گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)					
		RGR	NAR	LAR	SLA	LWR	RLGR
بلوک	۲	۰/۰۰۰۰۳ns	۰/۰۱ns	۰/۰۰۰۰۰۰۳ns	۴۲۳ns	۰/۰۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۰۵ns
Zn	۲	۰/۰۰۰۲*	۰/۵ns	۰/۰۰۰۰۰۰۶ns	۳/۱ns	۰/۰۰۲*	۰/۰۰۰۳*
K	۲	۰/۰۰۰۰۱ns	۱/۹*	۰/۰۰۰۰۰۵**	۲۷۵۰**	۰/۰۰۴۰۳**	۰/۰۰۰۰۷ns
Zn × K	۴	۰/۰۰۰۰۴ns	۱/۵*	۰/۰۰۰۰۰۲*	۱۳۱۱**	۰/۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۰۲ns
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۵	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۱۲۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۶
کل	۲۶	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (CV)		۶/۵	۸/۱	۵/۱	۴/۵	۳/۹	۶/۲

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

ادامه جدول ۱.

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)					
		SDW	SFW	RDW	RFW	SL	LWCA
بلوک	۲	۳/۶ns	۴۶۹ns	۰/۱۰ns	۳۹/۳ns	۱۲/۸ns	۳/۰ns
Zn	۲	۱۹/۸*	۱۶۱۱ns	۰/۲۵ns	۶۴/۳ns	۷۶ns	۲۴۷۵**
K	۲	۰/۶ns	۱۴۰ns	۰/۴۷ns	۱۳۱/۷*	۲۱/۲ns	۱۲۶۶**
Zn × K	۴	۲/۷ns	۳۰۹ns	۰/۳۷ns	۴۳/۵ns	۴۸/۴ns	۱۹۷۱**
خطا	۱۶	۵/۱	۴۸۰	۰/۲۳	۳۳/۹	۳۴/۱	۴/۶
کل	۲۶	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (CV)		۲۸/۲	۲۴/۹	۲۵/۶	۲۰/۳	۱۰/۱	۰/۵۶

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

نتایج و بحث

جداول ۱ و ۲ نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های مورد اندازه‌گیری را نشان می‌دهند.

در زیر به تفصیل به بیان نتایج اثرات اصلی و متقابل تیمارهای به کار رفته در مقابل اثرات منفی کادمیم بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک و بحث در باره آنها پرداخته می‌شود.

– اثر سطوح مختلف روی بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس مربوط به شاخص‌های رویشی جهت آنالیز رشد (جدول ۱) بیانگر اثر معنی‌دار تیمار روی بر برخی شاخص‌های رشد شامل RGR، LWR، RLGR، SDW و LWCA در سطح ۱٪ بود. تغییرات LWCA به عنوان یک عامل مهم جهت اندازه‌گیری کارآیی استفاده از آب در گیاه، بین سطوح مختلف روی (Zn) کاملاً معنی‌دار بود. به طوری که در تیمار سوم روی (Zn_3) مقدار این شاخص نسبت به Zn_2 به میزان ۴٪ کاهش نشان داد (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) نشان داد که میزان رشد نسبی (RGR) و شدت رشد نسبی برگ (RLGR) درسطح اول

www.SID.ir

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های فیزیولوژیک در گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)				
		کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	قند	نشاسته
بلوک	۲	۳/۵ns	۰/۷۴ns	۰/۱۷ns	۰/۳۲ns	۰/۰۹ns
Zn	۲	۵/۱ns	۲/۴ns	۰/۳۷ns	۱۸/۵**	۰/۳۲ns
K	۲	۶/۳ns	۱/۹ns	۰/۲۷ns	۱/۳ns	۰/۴۱ns
Zn × K	۴	۹/۹ns	۵/۳*	۰/۵۴*	۱۹/۹**	۵/۸**
خطا	۱۶	۳/۹	۱/۳	۰/۱۸	۰/۴۸	۰/۶۲
کل	۲۶	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (CV)		۱۱/۷	۱۴/۵	۱۰/۳	۹/۴	۲۲/۴

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

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف روی بر شاخص‌های رویشی*

غلظت روی	RLGR ($cm^2\ cm^{-2}d^{-1}$)	LWR ($g\ g^{-1}$)	SLA (cm^2g^{-1})	LAR ($m^2\ g^{-1}$)	NAR ($g\ m^{-2}d^{-1}$)	RGR (g/gd)
Zn_1	۰/۱۳a	۰/۶۱a	۲۴۴a	۰/۰۱۴a	۸/۹a	۰/۱۳a
Zn_2	۰/۱۲b	۰/۵۸ab	۲۴۳a	۰/۰۱۴a	۸/۶a	۰/۱۲b
Zn_3	۰/۱۲b	۰/۵۹b	۲۴۲a	۰/۰۱۴a	۸/۵a	۰/۱۲b

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

ادامه جدول ۳.

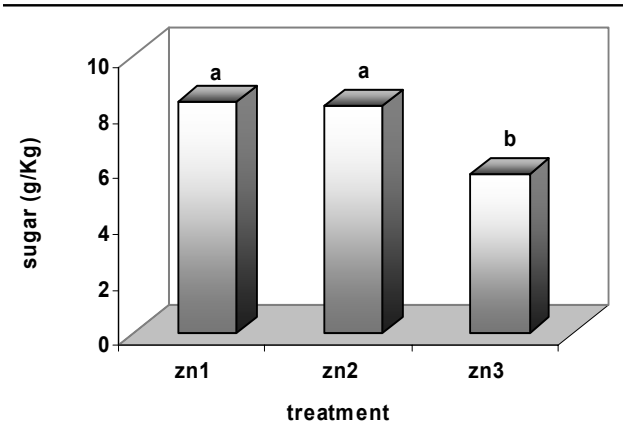
غلظت روی	RDW (g)	RFW (g)	SDW (g)	SFW (g)	SL (cm)	LWCA ($g(H_2O)\ m^{-2}$)
Zn_1	۱/۹a	۳۱/۱a	۹/۷a	۱۰۳/۴a	۶۰/۲a	۳۶۵c
Zn_2	۱/۹a	۲۵/۸a	۶/۹b	۷۸/۶b	۵۴/۶a	۳۹۹a
Zn_3	۱/۷a	۲۹/۳a	۷/۵ab	۸۲/۴ab	۵۸/۸a	۳۸۲b

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

تیمار روی (Zn_1) در مقایسه با دو سطح دیگر به طور معنی‌داری بیشتر بود و در سطوح دوم و سوم روی ۷/۷٪ کاهش نشان دادند. در واقع با افزایش غلظت روی، این صفات روند کاهشی از خود نشان دادند. LWR در سطح سوم تیمار روی ۳/۳٪ نسبت به سطح اول کاهش نشان داد. به نظر می‌رسد که افزایش دو برابری (Zn_2) و چهار برابری (Zn_3) غلظت روی در محلول غذایی بر شاخص‌های رشد در گیاه گوجه‌فرنگی تأثیر مطلوبی در جهت کاهش اثر سمیت کادمیم نداشته است. مورگان نیز در نتایج مشابهی نشان داد که جذب کادمیم با اضافه کردن روی به خاک افزایش می‌یابد (۱۶). همچنین حسن و همکاران (۱۱) در بررسی اثر کادمیم و روی در برنج مشاهده کردند که افزایش میزان روی باعث افزایش قابل توجه میزان کادمیم در بخش هوایی شد، در حالی که عنصر روی غلظت کادمیم ریشه‌ها را کاهش می‌دهد. مشخص شده که جابجایی

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. اثر سطوح مختلف روی بر میزان قندهای محلول

فلزات در گیاه به تولید فیتوکلاتین‌ها بستگی دارد (۱۱). فیتوکلاتین‌ها می‌توانند به فلزات سنگین اتصال یابند که به موجب آن از فعالیت یون‌های آزاد فلزات در سیتوسول کاسته می‌شود (۱۱). در واقع یک مکانیسم کلی و رایج برای سم‌زدایی فلزات سنگین در گیاهان و دیگر موجودات، کلات فلزات با یک لیگاند و در مواردی ذخیره کمپلکس فلز- لیگاند است (۷). به نظر می‌رسد تولید فیتوکلاتین به شدت در غلظت‌های زیاد کادمیم تحریک شده و کمپلکس کادمیم- فیتوکلاتین در واکوئل سلول‌های ریشه ذخیره شده و از این طریق جابجایی کادمیم کاهش می‌یابد. اضافه کردن روی برای تشکیل کمپلکس فیتوکلاتین- روی رقابت می‌کند و بنابراین مقدار کادمیم آزاد افزایش یافته و به دنبال آن باعث افزایش جابجایی کادمیم از ریشه به بخش هوایی می‌شود (۱۱).

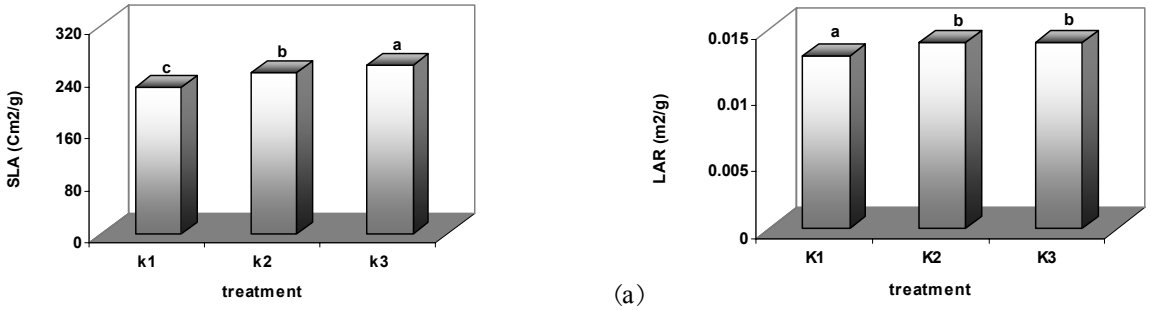
از طرفی، نتایج تجزیه واریانس مربوط به شاخص‌های فیزیولوژیک نشان داد که اثر سطوح مختلف روی فقط بر میزان قندهای محلول گیاه معنی‌دار بود و بر سایر شاخص‌های فیزیولوژیک تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). به طوری که کمترین میانگین درصد قند محلول در سطح سوم تیمار روی (Zn_3) با کاهش ۳۱/۳٪ مشاهده شد (شکل ۱). یعنی با افزایش غلظت روی در محیط، میزان قندهای محلول گیاه به کمترین مقدار رسید. میسرا و همکاران (۱۵) کاهش درصد قندهای محلول را در حضور کادمیم گزارش کردند. رای و همکاران (۱۸) کاهش میزان قندهای محلول را به طور غیرمستقیم وابسته به فرایندهای فتوسنتزی و تثبیت CO_2 بیان کردند و اظهار داشتند که با ورود کادمیم آنزیم‌های سیکل احیای کربن فتوسنتزی بازداشته می‌شود و کادمیم به عنوان یک فلز دو ظرفیتی بیشترین نقش خود را بر فعالیت روبیسکو در تعادل بین CO_2 و O_2 می‌گذارد. تأثیر کادمیم بر فعالیت روبیسکو به دلیل واکنش بین فلز و گروه SH مرکز فعال آنزیم و تغییر در ساختمان چهارم به دلیل پیوند غیرقابل برگشت می‌تواند به عنوان یکی از عوامل بسیار مهم در این زمینه ذکر شود و از سوی دیگر شروع تنش کادمیم بر فعالیت روبیسکو در مراحل بعدی چرخه کالوین تأثیر منفی دارد (۲۱).

پس به طور کلی مشخص شد که کاربرد روی به منظور کاهش اثرات سمی کادمیم در گیاه به علت اثر برهمکنش مثبت روی و کادمیم باعث افزایش کادمیم در بخش هوایی شده و اثرات سمیت آن در جهت کاهش شاخص‌های رشد و نیز کاهش قندهای محلول گیاه بروز نموده است.

- اثر سطوح مختلف پتاسیم بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک

اثر سطوح مختلف پتاسیم بر برخی شاخص‌های رویشی گیاه از جمله LAR، SLA، LWR، LWCA در سطح ۵٪ و بر NAR و RFW در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که بیشترین میزان NAR در گیاه مربوط به اولین سطح تیمار پتاسیم (K_1) بود و افزایش غلظت پتاسیم در دومین سطح (K_2) باعث کاهش ۹/۸٪ در میزان NAR شد. مقدار LAR در سطوح دوم و سوم پتاسیم (K_2 وK_3) به طور معنی‌داری از اولین سطح پتاسیم (K_1) ۷/۷٪ بیشتر بود. یعنی بین افزایش میزان پتاسیم و نسبت سطح برگ در گیاه ارتباط معنی‌داری وجود داشت (شکل ۲a). در این تحقیق مشخص شد که LWR در دومین سطح پتاسیم (K_2) افزایش معنی‌داری را نسبت به دو سطح

www.SID.ir



شکل ۲. (a) اثر سطوح مختلف پتاسیم بر نسبت سطح برگ (LAR) و(b) سطح ویژه برگی (SLA)

دیگر نشان داده است. محتوای آب در واحد سطح برگ (LWCA) با افزایش سطح پتاسیم به میزان ۵٪ کاهش یافت. سطح ویژه برگی (SLA) با افزایش سطوح پتاسیم به ترتیب ۱۰/۱٪ و ۱۵/۳٪ افزایش یافت. یعنی بیشترین مقدار برای این صفت در سطح سوم تیمار پتاسیم (K_3) و کمترین مقدار در سطح اول (K_1) مشاهده شد (شکل 2b).

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که LAR با افزایش سطوح پتاسیم افزایش معنی‌داری نشان داده است که حاکی از اثر برهمکنش منفی پتاسیم و کادمیم در برگ‌ها می‌باشد. این اثر برهمکنش منفی بین پتاسیم و کادمیم با نتایج مطالعات یومار و همکاران مطابقت داشت (۲۰). این محققین نشان دادند که اضافه کردن کادمیم به خاک باعث افزایش غلظت کادمیم در برگ‌های *Brassica campestris* L. گردید و تفاوت قابل توجهی در میزان کادمیم در گیاهان رشد یافته در غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک دیده شد. با کاربرد پتاسیم در این خاک‌ها به میزان ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مقدار کادمیم برگ به طور چشمگیری کاهش یافت که حاکی از تأثیر برهمکنش منفی پتاسیم بر جذب کادمیم توسط گیاه بود (۲۰). محققین نشان دادند که کاربرد کادمیم وزن توده خشک گیاه و همچنین سطح برگ را به طور چشمگیری کاهش داده و با کاربرد پتاسیم تأثیر سمیت کادمیم کاهش یافته و باعث افزایش ۲۸/۲۳و ۳/۷۶٪ سطح برگ در غلظت‌های ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک شده است (۲۰).

– اثر متقابل سطوح مختلف پتاسیم و روی در مقابل کادمیم بر شاخص‌های رویشی و فیزیولوژیک

همان‌گونه که جدول ۱ نشان می‌دهد اثر متقابل پتاسیم و روی بر شاخص‌های NAR و LAR در سطح ۱٪ و بر شاخص‌های SLA و LWCA در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده و اثر معنی‌داری بر سایر شاخص‌ها نداشته است. جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل پتاسیم و روی بر شاخص‌های رویشی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نشان داد که اثر متقابل پتاسیم و روی بر غلظت کلروفیل b و کاروتنوئیدها در سطح ۱٪ و بر میزان قندهای محلول و نامحلول در سطح ۵٪ معنی‌دار بود. جدول ۵ نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل پتاسیم و روی را بر شاخص‌های فیزیولوژیک نشان می‌دهد.

آنچه از جدول مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل پتاسیم و روی بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده استنباط می‌شود این است که هرگاه سطوح بالای دو عنصر (سطوح دوم و سوم) پتاسیم و روی در مقابل هم قرار می‌گیرند اثرات مشابه و معمولاً غیر معنی‌داری را بر شاخص مورد نظر از خود نشان می‌دهند. به این معنی که با توجه به اثرات اصلی که قبلاً شرح داده شد مشخص گردید که پتاسیم اثر متقابل منفی و روی اثر متقابل مثبت بر اثرات منفی کادمیم دارد. لذا وقتی سطوح بالای دو عنصر در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند اثر مثبت یا منفی یکدیگر را خنثی می‌نمایند. اما هنگامی که سطح پایین یک عنصر در مقابل سطح بالای عنصر دیگر قرار می‌گیرد اثر

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل پتاسیم و روی بر شاخص‌های رویشی*

تیمار	RGR (g/gd)	NAR ($g\ m^{-2}d^{-1}$)	LAR ($m^2\ g^{-1}$)	SLA ($cm^2\ g^{-1}$)	LWR ($g\ g^{-1}$)	RLGR ($cm^2\ cm^{-2}d^{-1}$)
Zn_1K_1	۰/۱۳a	۹/۳ab	۰/۰۱۳۶bdc	۲۳۷ b	۰/۵۸bc	۰/۱۳۱ab
Zn_1K_2	۰/۱۳a	۹/۲ ab	۰/۰۱۴abcd	۲۹۹b	۰/۶۳a	۰/۱۳۴a
Zn_1K_3	۰/۱۲a	۸/۳abc	۰/۰۱۵ab	۲۶۴a	۰/۶۰abc	۰/۱۳۱ab
Zn_2K_1	۰/۱۲a	۸/۶abc	۰/۰۱۳۳cd	۲۳۶b	۰/۵۷bc	۰/۱۱۸b
Zn_2K_2	۰/۱۲a	۸/۱bc	۰/۰۱۳۴abc	۲۴۷ab	۰/۶۰abc	۰/۱۲۰ab
Zn_2K_3	۰/۱۲a	۹/۲ab	۰/۰۱۳۶bcd	۲۴۷ab	۰/۵۶c	۰/۱۲۷ab
Zn_3K_1	۰/۱۲a	۹/۶a	۰/۰۱۲۶d	۱۶۶c	۰/۵۸bc	۰/۱۱۹ab
Zn_3K_2	۰/۱۲a	۷/۶c	۰/۰۱۵۳a	۲۶۴a	۰/۶۲ab	۰/۱۲۵ab
Zn_3K_3	۰/۱۲a	۸/۲abc	۰/۰۱۴۶abc	۲۶۴a	۰/۵۸bc	۰/۱۲۶ab

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

ادامه جدول ۴.

تیمار	SL (cm)	SDW (g)	SFW (g)	RDW (g)	RFW (g)	LWCA ($g(H_2O)\ m^{-2}$)
Zn_1K_1	۶۱/۵a	۹/۴ab	۱۰۱ab	۱/۷ab	۲۶/۴ab	۳۷۸d
Zn_1K_2	۶۰/۸a	۱۰/۶a	۱۱۱a	۲/۱ab	۳۶/۳a	۳۷۶d
Zn_1K_3	۵۸/۴ab	۹/۱ab	۹۷/۰ab	۲/۱ab	۳۰/۵ab	۳۴۲f
Zn_2K_1	۴۳/۵b	۶b	۶۶/۸b	۲/۰ab	۲۳/۸b	۳۹۰c
Zn_2K_2	۵۵/۱ab	۶/۵ab	۷۶/۰ab	۱/۴b	۲۵/۱ab	۴۰۳b
Zn_2K_3	۶۰/۲a	۸/۱ab	۹۲/۸ab	۲/۴a	۲۰/۶ab	۴۰۲b
Zn_3K_1	۵۹/۴ab	۸/۰ab	۸۴/۴ab	۱/۹ab	۲۳/۱b	۴۱۹a
Zn_3K_2	۵۷/۱ab	۷/۰ab	۷۶/۳ab	۱/۴b	۲۸/۸ab	۳۴۸e
Zn_3K_3	۶۰a	۷/۶ab	۸۶/۶ab	۱/۷ab	۳۶/۰a	۳۷۹d

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

جدول ۵: نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل پتاسیم و روی بر شاخص‌های فیزیولوژیک*

تیمار	نشاسته ($g\ kg^{-1}$	قند ($g\ kg^{-1}$)	کاروتنوئید ($mg\ ml^{-1}$)	کلروفیل b ($mg\ ml^{-1}$)	کلروفیل a ($mg\ ml^{-1}$)
Zn_1K_1	۴/۴ab	۵/۹c	۳/۷b	۶/۸bc	۱۵/۴b
Zn_1K_2	۳/۳bcd	۷/۷b	۴/۱ab	۷/۷bc	۱۶/۳ab
Zn_1K_3	۲/۳cd	۱۱/۳a	۳/۹ab	۷/۷bc	۱۶/۱ab
Zn_2K_1	۱/۱d	۱۰/۸a	۴/۴ab	۹/۰ab	۱۷/۸ab
Zn_2K_2	۳/۸bc	۷/۸b	۳/۹ab	۷/۲bc	۱۶/۲ab
Zn_2K_3	۵/۴a	۵/۹c	۴/۶a	۸/۳abc	۱۷/۷ab
Zn_3K_1	۳/۵bc	۵/۳c	۳/۷b	۶/۵c	۱۴/۴b
Zn_3K_2	۳/۳bcd	۵/۷c	۴/۷a	۱۰/۰ a	۱۹/۹a
Zn_3K_3	۳/۵bc	۶/۲c	۴/۱ab	۸/۷abc	۱۷/۷ab

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

Archive of SID
www.SID.ir

مشابه با اثر اصلی عنصر با سطح بالا بـر شـاخص مـورد نظـر ظاهر می‌گردد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی و به عنوان یک نتیجه‌گیری می‌توان گفت کـه روی و کادمیم در گیاه گوجـه‌فرنگـی بـرهمکنش مثبـت (سینرجیـسمی) دارند، یعنی افـزایش غلظـت روی در محلـول غـذایی بـرخلاف انتظـار، نـه تنهـا سـبب کـاهش اثـرات نـامطلوب کـادمیم بـر شاخص‌های رشد رویـشی و فیزیولوژیـک نمـی‌گـردد، بلکـه در برخی شرایط باعث تشدید اثر منفـی کـادمیم نیـز مـی‌گـردد. بـه عبارت دیگر وجود غلظت بالا و همزمان هر دو عنصر در محـیط ریشه باعث کاهش رشد و پایین آمدن میزان قندهای محلول گیـاه شده است. کاربرد پتاسـیم و وجـود غلظـت بـالای آن در محـیط ریشه در حضور کادمیم سبب افزایش نسبت سطح برگ و سـطح ویژه برگی شده و بـه ایـن ترتیـب بـا کـادمیم بـرهمکنش منفـی (آنتاگونیستی) داشته اسـت. بنـابراین از بـین دو عنـصر پتاسـیم و روی، تنها پتاسیم می‌تواند سبب کاهش اثرات سمی کادمیم از نظر جذب و انتقال آن به اندام‌های هوایی گیاه فوق باشد.

منابع مورد استفاده

۱. خاوری نژاد، ر. ۱۳۷۸. فیزیولوژی گیاهی عملی. انتشارات امید، تهران، صفحات ۳۲۸-۳۳۱.

۲. طباطبائی، ج. و ملکوتی، م. ج. ۱۳۸۴. تهیه بستر کشت، تغذیه و آبیاری در محصولات گلخانه‌ای. انتشارات سنا، تهران.

۳. قاسمی، ز.، شهابی، ع. ا. و یوسفی، م. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژیک، صفات رویـشی و غلظـت عناصـر غذایی در گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) در شرایط کـشت بـدون خـاک. مجلـه علـوم و فنـون کـشت‌هـای گلخانه‌ای ۱(۲): ۵۵-۶۵.

۴. ملکوتی، م. ج.، شهابی، ع. ا. و بازرگان، ک. ۱۳۸۴. پتاسیم در کشاورزی ایران. انتشارات سنا، تهران، صفحات ۱۰۸-۱۱۰.

5. Aravinad P., M. Narasimba and V. Prasad. 2005. Cadmium-zinc interactions in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: Adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. Braz. J. of Plant Physiol. 17(1): 3-20.
6. Benavides, M. P., S. M. Gallego and M. L. Tomaro. 2005. Cadmium toxicity in plants. Braz. J. of Plant Physiol. 17(1): 21-34.
7. Cataldo, C. A., T. R. Garland and R. E. Wildung. 1983. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. Plant Physiol. 73: 844-848.
8. Chaoui, A., M. H. Ghorbal and E. El-Ferjani.1997. Effects of cadmium-zinc on hydrogenically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Plant Sci. 126: 21-28.
9. 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. of Plant Sci. 75: 445-448.
10. Grant, C. A., W. T. Buckley, L. D. Bailey and F. Selles. 1997. Cadmium accumulation in crops. Can. J. of Plant Sci. 78: 1-17.
11. 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.
12. Kochert, G. 1978. Carbohydrate determination by the phenolsulfuric acid method. PP. 96-97. *In:* He Lebust, J. A. and Graig, J. S. (Eds.), Handbook of Physiological Methods, Cambridge. Univ. Press, Cambridge.
13. Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology 148: 350-382.
14. Maclean, A. J. 1976. Cadmium in different plant species and its availability in soils as influenced by organic matter and additions of lime, P, Cd and Zn. Can. J. Soil Sci. 56: 129-138.
15. Misra, N. and V. N. Owived, 1995. Carbohydrate metabolism during seed germination and seedling growth in green gram under saline stress. Biochem. 33: 33-38.
16. Moraghan, J. T. 1993. Accumulation of cadmium and selected elements in flax seed grown on a calcareous soil. Plant and Soil 150: 61-68.
17. Oliver, D. P., N. S. Wilhelm, J. D. McFarlane, K. G. Tiller and G. D. Cozenz. 1997. Effect of soil and foliar

Archive of SID

www.SID.ir

applications of zinc on cadmium concentration in wheat grain. Australian J. Expt. Agric. 37: 677-682.
18. Rai, V., S. Khatoon, S. S. Bisht and S. Mehrotra. 2005. Effect of cadmium on growth, ultramorphology of leaf and secondary metabolites of phylanthus amarus schum and thonn. Biochem. 61(11): 1644-1650.
19. Smild, K. W., B. V. Luit and W. V. Driel. 1992. The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium. Plant and Soil 143: 233-238.
20. Umar, S., I. Diva, N. A. Anjum and M. Iqbal. 2008. Potassium nutrition reduces cadmium accumulation and oxidative burst in mustard (*Brassica campestris* L.). *e-ifc No.*16.
21. Vasilev, A. and J. Yordanov. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium–treated plants: A review. Bulgarian J. of Plant Physiol. 23(3-4): 114-133.

Archive of SID

www.SID.ir