تأثیر کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژیک، صفات رویشی و غلظت عناصر غذایی در گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) در کشت بدون خاک

زهرا قاسمی[۱*] و علی‌اصغر شهابی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۱۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۶/۲۴)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژیک، صفات رویشی و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های مختلف گیاه گوجه‌فرنگی، آزمایشی گلخانه‌ای در سال ۱۳۸۷ در محل گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با دو تیمار و ۶ تکرار و در مجموع ۱۲ گلدان آزمایشی اجرا گردید. تیمارها شامل تیمار شاهد یعنی افزودن محلول غذایی هوگلند (فاقد کادمیم) و تیمار دوم شامل محلول غذایی هوگلند به علاوه غلظت ۲۰ میکرومولار کادمیم بود. شاخص‌های مورد اندازه‌گیری پس از انتقال نشاء و در طول فصل رشد، عبارت بودند از: شاخص‌های فیزیولوژیک شامل کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها و قندهای محلول و نامحلول، صفات رویشی شامل 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 (LS) و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه و غلظت عناصر غذایی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی، مس و عنصر آلاینده کادمیم در برگ، ساقه، ریشه و میوه بود. نتایج نشان داد که وجود غلظت ۲۰ میکرومولار کادمیم در محلول غذایی، سبب تأثیر معنی‌دار بر برخی شاخص‌های رویشی شده است، به طوری که شاخص‌های NAR،RGR، RLGR، LS، RDW (وزن خشک ریشه)، RFW (وزن تر ریشه)، SFW (وزن تر اندام هوایی) و SDW (وزن خشک اندام هوایی) به ترتیب ۱۳/۳، ۱۸/۴، ۱۳/۳، ۱۸/۹، ۵۹/۵، ۵۸/۷، ۵۳/۹ و ۶۵/۳ درصد کاهش و SLA به میزان ۱۲/۲ درصد افزایش یافت، اما تأثیر معنی‌دار بر شاخص‌های فیزیولوژیک نداشت. غلظت کادمیم در تمامی اندام‌های گیاه به جز میوه نسبت به شاهد افزایش داشت، با این توضیح که در تیمار شاهد چنانکه انتظار می‌رفت، وجود کادمیم مشاهده نگردید. افزایش غلظت کادمیم در ریشه بر غلظت منگنز و مس، در ساقه بر غلظت منگنز و فسفر و در برگ بر غلظت منگنز اثر معنی‌دار داشت. به طوری که میزان منگنز در برگ و ساقه نسبت به شاهد به ترتیب ۵/۳ و ۸۷/۶ درصد افزایش و در ریشه ۵۸/۴ درصد کاهش یافت. در ساقه، غلظت فسفر ۳۳/۳ درصد و در ریشه غلظت مس به میزان دو برابر افزایش نشان داد. در میوه نیز غلظت کلسیم ۷۶/۷ درصد کاهش یافت. به طور کلی و به عنوان یک نتیجه‌گیری از این آزمایش و با توجه به اثرات منفی این عنصر بر رشد گیاه می‌توان گفت که کادمیم به عنوان یک عنصر سمی برای گوجه‌فرنگی محسوب شده و به این جهت کشت آن در خاک‌های آلوده به این عنصر، قابل توجیه نبوده و توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: گوجه‌فرنگی، کادمیم، شاخص‌های فیزیولوژیک، صفات رویشی، عناصر غذایی

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

مقدمه

حضور فلزات سنگین و از جمله کادمیم در زیست‌بوم‌های کشاورزی از نظر تأثیر بر رشد و عملکرد گیاهان و سلامتی انسان بسیار حائز اهمیت است (۲۱). تأثیر نامطلوب کادمیوم بر وزن خشک و تر، ارتفاع، طول ریشه، سطح برگ و دیگر شاخص‌های گیاه در بیشتر تحقیقات گزارش شده است (۱۳). تفاوت در عکس‌العمل گیاه و میزان سمیت به علت تفاوت در میزان کادمیم محیط ریشه، تداوم تیمار و به ویژه نوع گیاه و رقم آن است (۱۳). باسژینسکی و همکاران (۳) اولین بار تأثیر منفی کادمیم را روی گیاه گوجه‌فرنگی گزارش دادند. اخیراً تأثیر مهاری کادمیم در دیگر گونه‌ها از جمله گندم، کدو، ذرت، باقلا و غیره گزارش شده است. در گیاه گوجه‌فرنگی، اضافه کردن ۱۰ میکرومولار کادمیم باعث کاهش وزن خشک برگ، ساقه و ریشه به ترتیب به میزان ۶۹/۸٪، ۶۷/۲٪ و ۸۶/۳٪ شد (۶). ابوقاسم و همکاران (۲) نشان دادند که تیمار گیاهان گندم در طی ۱۵ روز با غلظت ۱۰ میکرومولار کادمیم باعث کاهش ۲۰ درصدی میزان رشد نسبی در این گیاهان گردید. کاهش میزان رشد نسبی (RGR) در چغندرقند نیز توسط گریگر و همکاران (۹) گزارش شده است. هم‌چنین در مطالعه دیگری نشان داده شد که در گیاهان جوان جو، تحت تیمار کادمیم با غلظت ۵۴ میکرومولار، میزان رشد نسبی (RGR) ۸۵٪ کاهش یافت (۳۷). هم‌چنین کاربرد کادمیم میزان رنگدانه‌های گیاهی را کاهش می‌دهد. به طوری که غلظت کلروفیل a نسبت به کلروفیل b و کاروتنوئیدها بیشتر کاهش می‌یابد. تأثیر کادمیم بر رنگدانه‌های گیاهی به سن برگ و نمو گیاه بستگی دارد (۳۷). هم‌چنین غلظت مواد غذایی در برگ‌ها و ریشه‌ها به طور قابل توجهی تحت تأثیر کادمیم تغییر می‌کند. به طوری که وجود کادمیم در محلول غذایی باعث کاهش جذب روی، منگنز و به مقدار کمتر مس و آهن در برگ گردید. در حالی که در ریشه‌ها جذب منگنز فقط در غلظت ۵۰ میکرومولار کاهش یافت. این نتایج بیانگر این واقعیت است که کادمیم اساساً در تحرک و انتقال عناصر کم مصرف به برگ‌ها دخالت دارد (۲۹). در برنج که در حضور کادمیم رشد یافته بود، غلظت آهن، منگنز و مس در بخش هوایی کاهش یافت اما در ریشه‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد (۱۱). هم‌چنین تحقیقات نشان داده است که غلظت عناصر پرمصرف در حضور کادمیم به شدت در برگ‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که محتوای کاتیون‌های چند ظرفیتی می‌تواند با حضور کادمیم طی فرایندهای ضدیتی از طریق رقابت بر سر جایگاه‌های پیوندی یا توسط ناقلین تحت تأثیر قرار گیرد (۲۹). بدیهی است در صورت وجود خاک‌های آلوده، انجام تحقیقات از طریق کشت گیاهان مختلف و اندازه‌گیری میزان تأثیر منفی کادمیم بر صفات فیزیولوژیک، رویشی و عملکرد و مهمتر از همه میزان تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف و به ویژه اندام‌های مورد استفاده در زنجیره غذایی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این رابطه اطلاع از مبانی فیزیولوژیک جذب و انتقال و سوخت و ساز عناصر سمی (کادمیم) امری ضروری به نظر می‌رسد. چرا که در این صورت می‌توان راهکارهای لازم نظیر عدم کشت گیاهان جاذب و یا استفاده از اندام‌هایی از گیاه در زنجیره غذایی که حداقل تجمع (حد مجاز) کادمیم در آنها باشد، را ارائه نمود. با توجه به ضرورت بررسی تأثیر کادمیم به عنوان فلز سنگین بر صفات رویشی و فیزیولوژیک و غلظت عناصر غذایی در گوجه‌فرنگی، این تحقیق در شرایط گلخانه‌ای اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت گلخانه‌ای و در بستر کشت بدون خاک (پرلیت)، در سال ۱۳۸۷ در محل گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان طی یک دوره رویشی و میوه‌دهی و به مدت ۷۵ روز به اجرا درآمد. جهت کاشت گوجه‌فرنگی داربستی، از بذر رقم نورا (NORA) به عنوان یکی از بذرهای مرسوم و مورد کاشت در گلخانه‌های استان اصفهان استفاده شد. بذرهای گیاه 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 سانتی گراد و رطوبت ۵۰-۳۰ درصد، نشاهای سه برگی آماده انتقال به گلدان‌های (سه کیلویی) حاوی پرلیت در سیستم کشت بدون خاک برای آزمایش‌های اصلی شدند. این آزمایش در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با دو تیمار شاهد (محلول غذایی هوگلند بدون کادمیم) و دیگری تیمار اضافه کردن کادمیم به محلول غذایی بود که با ۶ تکرار و در مجموع ۱۲ گلدان آزمایشی در محیط کشت پرلیت به صورت سیستم باز به اجرا در آمد (۸). در این روش، محلول غذایی تیمار شده به روش آبیاری قطره‌ای طی ۳ تا ۶ نوبت در شبانه روز (بسته به مراحل رشد) توسط تایمر تنظیم و به گلدان‌ها اضافه می‌گردید. محلول اضافی از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در کف گلدان‌ها به محیط خارج هدایت می‌شد. برای تهیه تیمار کادمیم از نمک کلرور کادمیم ($CdCl_2.2.5H_2O$) استفاده شد. پس از ساخت محلول ۰/۰۲ مولار کلرور کادمیم، ۱ میلی لیتر از آن به ۱ لیتر محلول غذایی در هر مرحله ساخت محلول غذایی اضافه می‌شد. لازم به یادآوری است که انتخاب تعداد ۶ تکرار برای هر تیمار به دلیل لازم بودن برداشت طی دو زمان t_1 و t_2 بود که در هر نوبت نیز ۳ تکرار برداشت می‌شد. برای اندازه‌گیری شاخص‌های رشد شامل 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 (LS) و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، لازم بود وزن تر برگ، ساقه، ریشه و سطح برگ‌ها و وزن خشک برگ، ساقه و ریشه در دو زمان t_1 و t_2 اندازه‌گیری شود. به این ترتیب که پس از کشت بذرها و رویش آنها در مرحله سه برگی و قبل از اعمال تیمارها، اندازه‌گیری‌های لازم از جهت وزن تر، وزن خشک و سطح برگ (با استفاده از کاغذ میلی متری) روی گیاهان برداشت شده برای زمان t_1 انجام گرفت. پس از اعمال تیمارهای مورد نظر و گذراندن یک دوره رویشی، در مرحله میوه دهی (پس از یک دوره برداشت میوه) گیاهان برداشت شده و مقادیر فوق روی گیاهان برای زمان t_2 اندازه‌گیری و یادداشت گردید و سپس با استفاده از این داده‌ها و با استفاده از فرمول‌های مربوطه به شرح زیر، شاخص‌های زیر محاسبه گردید (۱):

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

در این رابطه، ln : لگاریتم نپر، W_2: وزن خشک اندام مورد نظر گیاه (بر حسب 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 (بر حسب 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 $gm^{-2}d^{-1}$ معرفی می‌شود.

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

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

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

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

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

که در آن L: سطح برگ و L DW: وزن خشک برگ است. SLA بر حسب cm^2g^{-1} معرفی می‌شود.

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

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

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

که در آن LFW: وزن تر برگ،LDW : وزن خشک برگ و L سطح برگ است. LWCA برحسب $g(H_2O)m^{-2}$ معرفی می‌شود.

جدول ۱. تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثر کادمیم بر صفات رویشی در گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)					
		RGR	NAR	LAR	SLA	LWR	RLGR
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۰۸۲	۰/۲۳	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۹۴/۴۸	۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۰۰۰۰۲۷
تیمار	۱	۰/۰۰۰۹۱**	۶/۶۸*	۰/۰۰۰۰۰۰۲^{ns}	۱۰۰۰/۲۷*	۰/۰۰۳۶^{ns}	۰/۰۰۰۸۶**
خطا	۲	۰/۰۰۰۰۰۵۲	۰/۳۳	۰/۰۰۰۰۰۰۲	۳۷/۸۲	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۰۰۲
کل	۵	–	–	–	–	–	–
ضریب تغییرات (CV)		۱/۶	۵/۵	۳/۰	۲/۷	۳/۵	۰/۹۹

**، * 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	LS	LWCA
تکرار	۲	۲/۴	۸۱/۲	۰/۵	۶۲/۳	۱/۲	۴/۳
تیمار	۱	۴۷۲/۶**	۲۱۱۵۸/۳**	۹۰/۳*	۲۱۰۵/۶*	۳۰۵/۳**	۸/۰^{ns}
خطا	۲	۴/۰	۳۸/۲	۰/۳	۶۹/۱	۰/۶	۲/۰
کل	۵	-	-	-	-	–	–
ضریب تغییرات (CV)		۱۰/۹	۳/۸	۱۸/۳	۱۸/۴	۱/۱	۰/۳۷

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

سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید به روش لیچتن تالر و سنجش مقدار قندها طبق روش کوچرت انجام شد (۱۶ و ۱۷). برای اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی، مس و کادمیم بر اساس روش‌های استاندارد و معمول، پس از آماده سازی نمونه‌های گیاهی، غلظت پتاسیم توسط دستگاه نور سنج شعله‌ای (فلیم فتومتر) و غلظت فسفر به روش رنگ‌سنجی با محلول معرف آمونیوم وانادات و با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۲۴). برای اندازه‌گیری عناصر کم مصرف شامل آهن، منگنز، روی، مس و کادمیم و هم‌چنین کلسیم و منیزیم از دستگاه جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrometery) استفاده گردید (۲۴). نیتروژن کل نیز به روش تیتراسیون بعد از تقطیر با استفاده از سیستم اتوماتیک (کجل تک اتوآنالیزور) محاسبه شد (۲۴). پس از اندازه‌گیری‌ها و ثبت نتایج، داده‌های خام توسط نرم افزار MSTAT-C مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ استفاده شد و رسم نمودارها نیز توسط نرم افزار EXCEL صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثر کادمیم بر شاخص‌های رویشی

نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر کادمیم بر صفات رویشی (جدول۱) نشانگر اثر معنی‌دار کادمیم بر شاخص‌های رشد شامل: RGR، RLGR، LS، SDW و SFW در سطح ۱٪ و NAR، SLA،

جدول ۲. میانگین اثر کادمیم بر شاخص‌های رویشی*

غلظت کادمیم (μm)	RLGR (cm^2/cm^2d)	LWR (g/g)	SLA (cm^2/g)	LAR (m^2/g)	NAR (g/m^2d)	RGR (g/gd)
۰	۰/۱۵a	۰/۶۴a	۲۱۲/۰۶b	۰/۰۱۳۳a	۱۱/۴۵a	۰/۱۵a
۲۰	۰/۱۳b	۰/۵۹a	۲۳۷/۸۸a	۰/۰۱۳۷a	۹/۳۴b	۰/۱۳b

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

ادامه جدول ۲.

غلظت کادمیم (μm)	SDW (g)	SFW (g)	RFW (g)	RDW (g)	LS (cm)	LWCA ($g(H_2O)/m^2$)
۰	۲۷/۱a	۲۲۰/۴a	۶۳/۹a	۴/۲a	۷۵/۸a	۳۸۰/۵a
۲۰	۹/۴b	۱۰۱/۶b	۲۶/۴b	۱/۷b	۶۱/۵b	۳۷۸/۲a

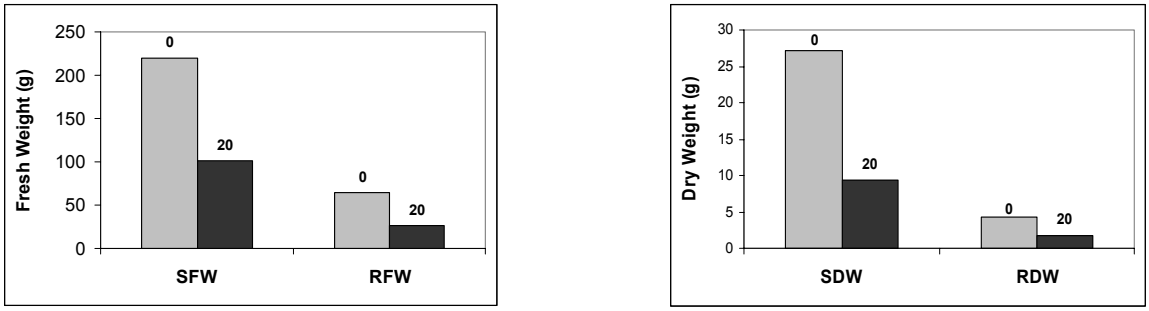
* : در هر ستون، میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند فاقد اختلاف آماری بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ می‌باشند.

RDW و RFW، در سطح ۵٪ در مقایسه با تیمار شاهد می‌باشد.

بر اساس مقایسه میانگین‌های نتایج، رشد نسبی گیاه (RGR)، طول ساقه (LS) و میزان ماده سازی خالص (NAR) در گیاهان تحت تیمار ۲۰ میکرومولار کادمیم نسبت به شاهد به ترتیب ۱۳/۳، ۱۸/۹ و ۱۸/۴ درصد کاهش نشان داد. هم‌چنین سطح ویژه برگی (SLA) یا همان نسبت سطح برگ به وزن خشک آن درگیاهان تحت تیمار کادمیم در مقایسه با شاهد به میزان ۱۲/۲٪ افزایش یافت. افزایش غلظت کادمیم در محیط ریشه سبب کاهش وزن خشک برگ در واحد سطح گردید، که این به مفهوم نوعی اختلال در فرایند رشد به حساب می‌آید. شدت رشد نسبی برگ (RLGR)، به عنوان یکی از اجزای RGR به میزان ۱۳/۳٪ در مقایسه با گیاه شاهد کاهش یافته بود (جدول ۲). کاهش شدت رشد نسبی برگ که طبق تعریف میزان افزایش روزانه سطح برگ بر مبنای سطح کل برگ را نشان می‌دهد، به نوعی نشان دهنده اثر منفی کادمیم بر فرایند رشد می‌باشد. در مورد تأثیر کادمیم بر وزن خشک و تر ریشه و اندام هوایی، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار کادمیم باعث کاهش ۵۸/۷ درصدی وزن تر ریشه و کاهش ۵۳/۹ درصدی وزن تر بخش هوایی شده است (جدول ۲). وزن خشک ریشه و اندام هوایی نیز به ترتیب از ۴/۲ و ۲۷/۱ گرم در گیاهان شاهد به ۱/۷ و ۹/۴ گرم در گیاهان تحت تیمار کاهش معنی‌داری را نشان داد (جدول ۲ و شکل ۱).

کاهش شاخص‌های رویشی تحت تأثیر کادمیم با نتایج برخی محققان در این خصوص مطابقت داشت. واسیلف و یوردانف (۳۷) مهار میزان رشد نسبی را تحت تأثیر کادمیم، در چغندرقند و گندم گزارش نمودند. ابوقاسم و همکاران (۲) نیز در نتایج مشابهی نشان دادند، میزان میزان رشد نسبی در گندم که در معرض غلظت ۱۰ میکرومولار قرار گرفتند، ۲۰ درصد کاهش یافت. هم‌چنین در مطالعه دیگری نشان داده شد که کادمیم در غلظت ۱۳ میکرومولار، میزان رشد نسبی (RGR) را به میزان ۲۵ درصد در گیاهان جو کاهش داده است (۳۶).

نتایج محققین نشان می‌دهد کاهش رشد بخش هوایی در نتیجه تأثیر کادمیم می‌تواند به علت کاهش میزان کلروفیل و فعالیت فتوسیستم I که در اثر تنش عناصر سنگین القا می‌شود ایجاد گردد (۳۲). هم‌چنین شانکر و همکاران اظهار داشتند که عناصر سنگین که به بخش هوایی گیاه انتقال داده می‌شوند، به علت اختلال در سوخت و ساز سلولی بخش هوایی، ارتفاع گیاه



شکل ۱. تأثیر کادمیم بر وزن تر (a) و وزن خشک (b) ریشه و اندام هوایی

را کاهش می‌دهند (۳۳). کاهش رشد ممکن است به طور کلی به علت از دست رفتن اتساع سلولی و نیز کاهش فعالیت میتوزی و یا مهار طویل شدن سلول‌ها باشد (۳۲). هم‌چنین کادمیم در سلول‌ها از طریق تأثیر بر دیواره‌های سلولی و تیغه میانی و افزایش پیوند عرضی بین ترکیبات دیواره سلولی باعث مهار گسترش سلولی می‌شود (۱۳). واسیلف (۳۵) چنین گزارش نموده است که میزان رشد نسبی یا RGR اساساً به علت مهار میزان ماده سازی خالص یا NAR کاهش می‌یابد. میزان ماده سازی خالص (NAR) که نرخ افزایش وزن خشک در واحد سطح برگ در مدت زمان مشخص را نشان می‌دهد به میزان فتوسنتز، تنفس سلولی و نسبت اندام‌های غیر فتوسنتزی بستگی دارد (۳۵). مشابه نتایج این تحقیق در مورد گیاه سویا نیز گزارش شده است. به طوری که افزایش کادمیم در محیط رشد تولید ماده خشک در ریشه‌ها و بخش هوایی را که با کاهش میزان رشد نسبی (RGR)، میزان ماده سازی خالص (NAR) و نسبت سطح برگ همراه است، کاهش می‌دهد (۱۰). تأثیر بر میزان ماده سازی خالص (NAR) عمدتاً به علت اثر منفی کادمیم بر تنفس و فتوسنتز می‌باشد که به علت ممانعت از ورود CO_2 سبب کاهش سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک گیاهی خواهد شد (۳۶). افزایش سطح ویژه برگی نشان دهنده تشکیل برگ‌های نازکتر در گیاهان تحت تیمار می‌باشد. مشابه نتایج این تحقیق، یعنی کاهش وزن تر ریشه و بخش هوایی ناشی از وجود غلظت بالای کادمیم در محیط ریشه، از طرف برخی محققین دیگر نیز گزارش شده است (۱۴ و۳۴). در بررسی تأثیر سطوح مختلف کادمیم بر گیاه *Phyllanthus amarus* نشان داده شد که کادمیم باعث کاهش چشمگیر در وزن تر و خشک گیاه و طول ریشه و بخش هوایی می‌شود (۲۷). کاهش توده بخش هوایی با افزایش غلظت عناصر سنگین ممکن است به علت حساسیت آنزیم‌های سیکل احیای کربن فتوسنتزی به کادمیم باشد (۳۱). یافته‌های اخیر در مورد کاهش وزن تر حاکی از عدم ورود آب به درون بافت‌های گیاهی است. به طوری که مشخص شده است، گیاهان تحت تیمار کادمیم در غلظت‌های بالاتر از۱۰ میکرومولار، محتوای آبی کمتری نسبت به گیاهان شاهد دارند و این کاهش در آماس برگ می‌تواند به علت افزایش مقاومت به جریان آب در ساقه و یا تغییر خواص دیواره سلولی که در اثر کادمیم القا می‌شود، باشد (۳۰). کاهش وزن خشک می‌تواند نتیجه تأثیر کادمیم بر میزان ماده سازی خالص (NAR) و میزان رشد نسبی (RGR) و یا اختلال و به هم خوردن تعادل آبی در سلول‌های گیاهی و یا در نتیجه تأثیر کادمیم بر سوخت و ساز عناصر ضروری باشد. هم‌چنین کاهش وزن خشک بخش هوایی در اثر سمیت کادمیم در ارقام گندم می‌تواند به طور مستقیم در اثر مهار فتوسنتز باشد (۱۵).

اثر کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژی

چنانکه جدول ۳ نشان می‌دهد، کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژی تأثیر معنی‌داری نداشته است که با نتایج برخی محققین و از جمله واسیلف و یوردانف (۳۷) مغایر است. این

جدول۳ . میانگین نتایج مربوط به اثر کادمیم بر شاخص‌های فیزیولوژیک*

غلظت کادمیم (μm)	نشاسته g/kg	قند g/kg	کاروتنوئید mg/ml	کلروفیل b mg/ml	کلروفیل a mg/ml
۰	۳/۰a	۶/۵a	۴/۴a	۸/۱a	۱۹/۷a
۲۰	۴/۴a	۵/۹a	۳/۷a	۶/۸a	۱۵/۴a

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

جدول ۴. تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثر کادمیم برعناصر غذایی اندازه‌گیری شده در برگ گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)									
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd
تکرار	۲	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۹۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۱۱/۷	۱۲۵/۰	۷۵/۷	۷/۵	۷۱/۹
تیمار	۱	۰/۵۱^{ns}	۰/۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۲۳^{ns}	۰/۰۰۰۸^{ns}	۳۵۲/۷^{ns}	۳۶۹۰/۲ *	۱۶۸/۵^{ns}	۵۲/۸^{ns}	۱۴۳۰۸/۲ *
خطا	۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۱۴	۰/۱۲۶	۰/۰۵	۰/۰۴۱	۶۸/۷	۷۳/۲	۱۰۷/۵	۱۳/۰	۷۱/۹
کل	۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات		۵/۲	۶/۷	۷/۹	۱۱/۸	۴۸/۵	۱۰/۸	۱۱/۶	۲۸/۲	۳۷/۴	۱۷/۴

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

تفاوت در عکس‌العمل گیاه می‌تواند احتمالاً به علت تفاوت در میزان کادمیم محیط ریشه، تداوم تیمار و به ویژه نوع گیاه و رقم آن باشد.

اثر کادمیم بر عناصر غذایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که وجود کادمیم در حد آلاینده در محلول غذایی، بر میزان عناصر منگنز و کادمیم برگ، هم‌چنین بر میزان فسفر، منگنز و کادمیم ساقه و نیز بر میزان مس، منگنز و کادمیم ریشه و بر غلظت کلسیم در میوه نسبت به شاهد تأثیر معنی‌دار در سطح ۵٪ داشته است و بر سایر عناصر بخش‌های مختلف گیاه تأثیر معنی‌داری نداشت (جداول ۴، ۵، ۶ و ۷).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میزان منگنز در برگ و ساقه گیاهان تحت تیمار کادمیم نسبت به شاهد به ترتیب ۵/۳ و ۸۷/۶ درصد افزایش یافته است و این اختلاف غلظت به لحاظ آماری معنی‌دار بود. اما در ریشه‌ها برخلاف بخش هوایی، میزان منگنز۵۸/۴٪ کاهش نشان داد. به عبارت دیگر جذب و انتقال منگنز به اندام‌های هوایی در حضور غلظت بالای کادمیم در محیط ریشه در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافته است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت فسفر در ساقه گیاهان تحت تیمار نسبت به شاهد ۳۳/۳٪ افزایش یافته است. در مورد غلظت مس ریشه مشخص شد که گیاهان تحت تیمار، غلظت مس در مقایسه با شاهد تقریباً به میزان دو برابر افزایش یافته است. بررسی میانگین‌های غلظت کلسیم در میوه نشان داد که غلظت کلسیم در میوه گیاهان تحت تیمار کادمیم نسبت به شاهد ۷۶/۷٪ کاهش یافته است. این کاهش غلظت کلسیم در میوه باعث بروز ظاهری عارضه پوسیدگی گلگاه (Blosoom end rot) گردید.

در بررسی میزان تجمع کادمیم در بخش‌های مختلف گیاه مشخص شد که بیشترین تجمع به ترتیب در ریشه، برگ و ساقه

جدول ۵ . تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثر کادمیم برعناصر غذایی اندازه‌گیری شده در ساقه گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)									
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd
تکرار	۲	۰/۰۷	۰/۰۰۴	۰/۳۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۵	۱/۱	۰/۳۸	۸/۹	۱۷۷/۴	۲۴/۶
تیمار	۱	۰/۸۷^{ns}	۰/۰۲۴ *	۰/۱۱^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۳۵/۵ ^{ns}	۱۶۶/۴ *	۰/۰۰۷ ^{ns}	۱۸۵/۹^{ns}	۸۶۸/۸ *
خطا	۲	۰/۱۳	۰/۰۰۰۷	۰/۴۶	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴	۱۷/۴	۲/۷	۳۳/۹	۱۷۲/۹	۲۴/۶
کل	۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات		۱۲/۷	۷/۴	۱۳/۷	۳۴/۴	۱۹/۰	۲۷/۱	۹/۴	۳۴/۱	۱۳۹/۴	۴۱/۲

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

جدول۶ . تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثر کادمیم برعناصر غذایی اندازه‌گیری شده در ریشه گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)									
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd
تکرار	۲	۰/۲۱	۰/۱۰۴	۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۰۳۵	۱۰۵۸۶۵/۸	۱۸۵۰۱/۱	۸۹۳/۵	۶۹/۱	۹۶۴/۵
تیمار	۱	۰/۱۶^{ns}	۰/۰۲۸^{ns}	۰/۴۳^{ns}	۴/۱^{ns}	۰/۰۶^{ns}	۱۰۵۴۴۳/۵^{ns}	۲۸۷۲۴۰/۶ *	۱۲/۳^{ns}	۷۷۵/۲ *	۱۲۹۱۴۰۴/۸*
خطا	۲	۰/۴۴	۰/۰۰۲	۰/۰۵	۱/۱	۰/۰۹۵	۱۷۰۴۶/۱	۳۷۱۴/۱	۵۳۱/۱	۲۵/۹	۹۶۴/۵
کل	۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات		۱۷/۵	۳/۶	۵/۵	۹۲/۵	۵۱/۴	۱۰/۹	۱۱/۵	۳۲/۰	۱۶/۰	۶/۷

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

جدول ۷: تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثر کادمیم برعناصر غذایی اندازه‌گیری شده در میوه گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)									
		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd
تکرار	۲	۰/۰۶۹	۰/۰۱۱	۰/۵۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۷۲/۹	۹/۱	۳۳۱/۰	۴۳/۵	-
تیمار	۱	۰/۱۷^{ns}	۰/۰۰۷^{ns}	۱/۰۴^{ns}	۰/۰۸۱*	۰/۰۲۲^{ns}	۱۰۶۱/۳^{ns}	۱/۵^{ns}	۵۴۱/۵^{ns}	۲۹/۹^{ns}	-
خطا	۲	۰/۵۲	۰/۰۰۵۶	۰/۱۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۲۲۷/۳	۱/۸	۲۹۷/۲	۲۸/۷	-
کل	۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات		۲۷/۱	۱۶/۴	۹/۳	۳۱/۸	۲۷/۴	۴۰/۲	۱۲/۷	۴۹/۷	۳۹/۳	-

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

می‌باشد. میزان کادمیم در ریشه، ساقه و برگ گیاهان تحت تیمار نسبت به شاهد اختلاف معنی‌دار داشت. لازم به توضیح است که در گیاه شاهد چنانکه انتظار می‌رفت به دلیل عدم وجود کادمیم در محیط، وجود این عنصر در اندام‌های مختلف مشاهده نگردید.

همان‌طور که ذکر شد عناصر سنگین می‌توانند بر عناصر کم مصرف و پرمصرف در گیاه اثر گذاشته و بنابراین باعث تأثیر قابل توجه بر جذب عناصر غذایی شوند. این اثرات بستگی به غلظت یون‌ها، pH و حضور کلات‌ها دارد (۲۷). بنابراین نتایج این گونه آزمایش‌ها بر عناصر غذایی ضد و نقیض بوده و به سختی قابل مقایسه است. برای مثال حقیری (۱۲) گزارش کرد که کادمیم جذب آهن را در سویا کاهش می‌دهد به طوری که باعث کلروز برگی می‌شود. ناروال و همکاران (۲۲) نیز کاهش جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، مس و سدیم را در حضور کادمیم توسط ریشه در ذرت نشان دادند. در حالی که نوسیتو و همکاران (۲۳) بیان کردند که کادمیم جذب پتاسیم توسط ریشه را کاهش می‌دهد، اما برجذب فسفر تأثیری ندارد. حتی سیکو و همکاران (۵) اظهار داشتند که کادمیم محتوای پتاسیم را در بخش هوایی و ریشه ذرت و جو افزایش می‌دهد ولی محتوای پتاسیم ریشه کمتر از بخش هوایی است. تعداد دیگری از محققین گزارش کردند که کادمیم میزان منگنز را در برنج، جو و ذرت کاهش و میزان مس را افزایش داده ولی تغییری در میزان کلسیم، منیزیم و روی در برنج و ذرت نداده است (۴ و ۳۹). در آزمایش دیگری در مطالعه تأثیر کادمیم بر عناصر غذایی در گوجه‌فرنگی در دو غلظت ۱۰ و ۳۰ میلی گرم در لیتر کادمیم نشان داده شد که کادمیم برغلظت منگنز در ریشه و ساقه اثر گذاشته و باعث کاهش آن می‌شود (۲۰). محققین در مطالعه‌ای روی سرخاب کولی (*Phytolacca americana* L.) نشان دادند که جذب منگنز در حضور کادمیم کاهش می‌یابد. کاهش چشمگیر در جذب منگنز در دیگر گیاهانی که در معرض تیمار کادمیم قرار گرفتند از جمله کاهو و نخود نیز مشاهده شد (۲۶). اما راموس و همکاران (۲۸) نشان دادند که غلظت منگنز در بخش هوایی کاهو زمانی که کادمیم در حد سمیت باشد افزایش می‌یابد که می‌تواند به عنوان یک مکانیسم دفاعی در مقابل سمیت کادمیم باشد. مشخص شده است که چندین ناقل غشایی در انتقال Mn^{2+} شرکت دارند، از جمله اعضای خانواده Narmp و ZIP که Cd^{2+} را نیز منتقل می‌کند. بنابراین پذیرفته شده است که در گیاه *Phytolacca americana* L. یون‌های Cd^{2+} و Mn^{2+} از یک ناقل استفاده می‌کنند (۲۶). با توجه به افزایش فسفر در گیاهان تحت تیمار کادمیم می‌توان گفت که نتایج دلالت بر اثر هم‌افزایی کادمیم و فسفر دارد. نتایج محققین نشان می‌دهد که غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه تحت تأثیر غلظت‌های سمی کادمیم آسیب دیده و نفوذ پذیری آن تغییر می‌کند. بنابراین جذب فسفر توسط ریشه تسهیل می‌شود و غلظت فسفر در بخش هوایی افزایش می‌یابد (۱۴). در تحقیقات لیو و همکاران (۱۸) ارتباط قابل توجه مثبتی بین کادمیم و مس در ریشه و برگ‌های کولتیوارهای برنج نشان داده شده است. افزایش غلظت کلسیم در شرایط تنش کادمیم یک ساز و کار ممکن برای کاهش اثر سمی کادمیم بوده و کاهش غلظت کلسیم در شرایط سمیت کادمیم ممکن است نشانه آسیب سیستم دفاعی داخلی باشد (۱۵). در بررسی میزان تجمع کادمیم در بخش‌های مختلف گیاه گوجه‌فرنگی مشخص شد که بیشترین تجمع به ترتیب در ریشه، برگ و ساقه می‌باشد. میزان کادمیم در ریشه، ساقه و برگ گیاهان تحت تیمار نسبت به شاهد اختلاف معنی‌دار دارد، به طوری که در گیاه شاهد کادمیم گزارش نشد. الگوی تجمع کادمیم در این تحقیق مشابه تحقیقات صورت گرفته توسط ماروتی و همکاران (۱۹) است. آنها نشان دادند در گیاهان تحت تیمار کادمیم در غلظت‌های زیاد، میزان تجمع این عنصر به ترتیب در ریشه‌ها، برگ‌های پایینی، ساقه‌ها و برگ‌های بالایی می‌باشد. هم‌چنین پنگ و همکاران (۲۶) تجمع کادمیم را در اندام‌های مختلف گیاهان تحت تیمار به ترتیب در ریشه، برگ و ساقه گزارش کردند.

به طور کلی و به عنوان یک نتیجه‌گیری از این آزمایش و با توجه به اثرات منفی این عنصر بر رشد گیاه می‌توان گفت که

کادمیم به عنوان یک عنصر سمی برای گوجه‌فرنگی محسوب شده و به این جهت کشت آن در خاک‌های آلوده به این عنصر قابل توجیه نبوده و توصیه نمی‌شود.

منابع مورد استفاده

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

2. Abo-Kassem, E., A. Sharaf-El-Din, J. Rozema and E. Foda. 1995. Synergistic effects of cadmium and NaCl on the gowth, photosynthesis, and ion content in wheat plants. Biologia Plantarum 37(2): 241–249.
3. Baszynski, T., L. Wajda, M. Krol, D. Wolinska, Z. Krupa and A. Tukendorf. 1980. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. Physiol. Plantarum 48: 365–370.
4. Brune, A. and K. Dietz. 1995. A comparative analysis of element composition of roots of barley seedlings growth in the presence of toxic cadmium, molybdenum, nickel, and zinc concentrations. Plant Nutr. 18: 853-868.
5. Ciecko, Z., S. Kalembasa, M. Wyszkowski and E. Rolka. 2004. Effect of soil contamination by cadmium on potassium uptake by plants. Pol. J. Environ. Stud. 13: 333-337.
6. Dong, J., F. Wu and G. Zhang. 2005. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. J. of Zhejiang University Science B 6(10): 974-980.
7. Ehn, C. 2003. Cadmium review. Nordic Council of Ministers 1(4): 2-22.
8. Gamborg, O. L. and L. R. Wetter. 1975. Plant tissue culture methods. Saskatoon. Natl. Res. Council of Canada.
9. Greger, M., E. Brammer, S. Lindberg, G. Larsson and J. Idestam–Almquist. 1991. Uptake and physiological effects of cadmium in sugar beet (*Beta vulgaris*) related to mineral provision. Experimental Botany 42: 729–737.
10. Ghorbanli M., S. H. Kaveh and M. F. Sepehr. 2000. Effects of cadmium and giberlin on growth and photosynthesis of *Glycine Max*. Photosynthetica 37(4): 627-631.
11. Gussarson, M., H. Asp, S. Adalsteinsson and P. Jensen. 1996. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of Birth (*Betula pendula*) by buthionine sulphoximine (BSO). Experimental Botany 47: 211-215.
12. Haghiri, F. 1973. Cadmium uptake by plants. J. Environ. Qual. 2: 93-96.
13. Hassan, M. J., Z. Zhu, B. Ahmad and Q. Mahmood. 2006. Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. Caspin J. Env. Sci. 4(1): 1-8.
14. Jiang X. J., Y. M. Luo, Q. Liu, S. L. Liu and Q. G. Zhao. 2004. Effects of cadmium on nutrient uptake and translocation by Indian Mustard. Environ. Geochem. and Health 26: 319-324.
15. Khan N. A., I. Ahmad, S. Singh and R. Nazar. 2006. Variation in growth, photosynthesis and yield of five wheat cultivars exposed to cadmium stress. World J. of Agric. Sci. 2(2): 223-226.
16. Kochert, G. 1978. Carbohydrate determination by the phenolsulfuric acid method. PP. 96-97. *In:* J. A. Lebust and J. S. Graig (Eds.), Handbook of Phycological Methods, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
17. Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembrans. Methods in Enzymology 148: 350-382.
18. Liu, J., K. Li, J. Xu, J. Liang, X. Lu, J. Yang and Q. Zhu. 2003. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes. Field Crops Research 83: 271-281.
19. Maruthi Sridhar, B. B., S. V. Diehl, F. X. Han, D. L. Monts and Y. Su. 2005. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea*). Environ. and Experimental Botany 54: 131-141.
20. Moral, R., I. Gomez, J. N. Pedreno and J. Mataix. 1996. Effects of cadmium on nutrient distribution, yield, and growth of tomato grown in soiless culture. Plant Nutr. 17: 953-962.
21. Moreno–Caselles, J., R. Moral, A. Perez–Espinosa and M. D. Perez–Murcia. 2000. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant. Plant Nutr. 23(2): 243-250.
22. Narwal, R., P. Mahendra Singh and M. Singh. 1993. Effect of cadmium and zinc application on quality of maize. Ind. J. Plant Physiol. 36: 170-173.
23. Nocito, F. F., L. Pirovano, M. Cocucci and G. A. Sacchi. 2002. Cadmium-induced sulphate uptake in maize roots. Plant Physiol. 129: 1872-1879.
24. Page, A. L., R. H. Miller and H. Keeney. 1992. Method of Soil Analysis, Part 2, Am. Soc. of Agron., Madison, WI.
25. Pal, M., E. Horvath, T. Janda, E. Paldi and G. Szalai. 2006. Physiological changes and defense mechanisms induced by cadmium stress in maize: Review. J. of Plant Nutr. and Soil Sci.169: 239-246.
26. Penge, K., C. Luo, W. You, C. Lian, X. Li and Z. Shen. 2008. Mangenese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator-*Phytolacca Americana* L. J. Hazardous Materials 154: 674-681.

27. Rai, V., S. Khatoon, S. S. Bisht and S. Mehrotra. 2005. Effect of cadmium on growth, ultramorphology of leaf and secondary metabolits of phylanthus amarus schum and thonn. Biochem. 61(11): 1644-1650.
28. Ramos, I., E. Esteban, J. J. Lucena and A. Garate. 2002. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp. Cd-Mn interaction. Plant Sci. 162: 761-767.
29. 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. Experimental Botany 52(364): 2115-2126.
30. Sayed, S. A. 1997. Effect of cadmium and kinetin on transpiration rate, stomatal opening and leaf relative water content in safflower plants. J. of Islamic Academy of Sciences 10(3): 73-80.
31. Sheoran, I., H. Singal and R. Singh, 1990. Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and the enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). Photosynthesis Research 23: 345–351.
32. Shah, F. R., N. Ahmad, K. R. Masood and D. M. Zahid. 2008. The influence of cadmium and chromium on the biomass production of shisham (*Dalbergia sissoo* ROXB.) seedlings. Pak. J. Bot. 40(4): 1341-1348.
33. Shanker, A. K., C. Cervantes, H. Loza-Tavera and S. Avudainayagam. 2005. Chromium toxicity in plants. Environ. Int. 31: 63-68.
34. Shenker, M., T. W. M. Fan and D. E. Crowley. 2001. Phytosiderophores influence on cadmium mobilization and uptake by wheat and barley plants. J. Environ. Qual. 30: 2091-2098.
35. Vassilev, A. 2003. Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: An overview. J. of Central European Agriculture 4(1): 65-76.
36. Vassilev, A. 2003. Barley seedlings as bio-indicators for water contamination by cadmium, J. of Environmental Protection and Ecology 4(2): 354-360.
37. Vassilev, A. and I. Yordanov. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium–treated plants: A review. Plant Physiol. 23(3-4): 114-133.
38. Wang, J., B. P. Evangelou and M. T. Nielson. 1992. Surface chemical properties of purified root cell walls from two tobacco genotypes inhibiting different tolerance to manganese toxicity. Plant Physiol. 100: 496-501.
39. Yang, X., V. C. Baligar, D. C. Martens and R. B. Clark. 1996. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrition in plant species Plant Nutr. 19: 643-656.