اثر کادمیم بر برخی پارامترهای فیزیولوژیک در ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ تحت شرایط آبکشت

لایق مرادی[۱] و پرویز احسان‌زاده[۱*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۳۰)

چکیده

به منظور بررسی اثر کادمیم بر برخی پارامترهای فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های گلرنگ، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و در محیط آبکشت در گلخانه آموزشی و پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۹۱ اجرا گردید. چهار سطح کادمیم (شاهد (صفر)، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر) و شش ژنوتیپ گلرنگ (اراک۲۸۱۱، کوسه، نبراسکا، C_{111}، K_{12} و S_{149}) به‌عنوان فاکتورهای آزمایشی در نظر گرفته شدند. پارامترهای تعداد برگ در گیاه، وزن تر برگ، وزن تر ساقه، حجم ریشه، وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت کادمیم در ریشه و بخش هوایی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح کادمیم محلول غذایی، تأثیر منفی کادمیم بر ویژگی‌های مختلف آشکارتر شد. اعمال تیمار ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم باعث کاهش ۶۱/۲، ۳۷/۵ و ۷۱/۸ درصدی در طول ریشه، تعداد برگ و حجم ریشه و افزایش حدود ۵۲ و ۱۵۶ برابری میزان غلظت کادمیم در شاخساره و ریشه نسبت به تیمار شاهد شد. غلظت کادمیم شاخساره در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه کمتر از غلظت این عنصر در ریشه بود. از نتایج این آزمایش می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که کادمیم سبب تغییر جدی در ویژگی‌های فیزیولوژیک و رشد گلرنگ گشته و بین ژنوتیپ‌های گلرنگ از این نظر تفاوت وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، غلظت کادمیم، پارامترهای رشد گلرنگ

Archive of SID

مقدمه

آلوده شدن منابع آب و خاک به فلزات سنگین به‌عنوان یک مشکل جهانی در حال گسترش محسوب می‌شود که در نتیجهٔ افزایش فعالیت‌های صنعتی نظیر معدن‌کاوی، استخراج و ذوب فلزات، و هم‌چنین کاربرد کودها، سموم، قارچ‌کش‌های کشاورزی و غیره می‌باشد، که سلامتی بشری و زیست بوم را به خطر می‌اندازد (۲۳). کادمیم عنصری با وزن اتمی ۱۱۲/۴، نقطه ذوب ۳۲۱ درجه سلسیوس و نقطه جوش ۷۶۷ درجه سلسیوس می‌باشد (۱). غلظت کادمیم در لیتوسفر (قسمت خاکی کره زمین) حدود ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد و محدوده غلظت آن در خاک‌ها بین ۰/۰۱ تا ۰/۷ و میانگین ۰/۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. کادمیم به‌عنوان یک فلز سنگین دارای سمیت بالایی برای موجودات زنده بوده و یکی از ماندگارترین عناصر آلوده کننده محیط زیست است (۱۳ و ۲۳).

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ehsanzadehp@gmail.com

www.SID.ir

کادمیم برای فعالیت‌های متابولیک در گیاه ضروری نبوده، برای گیاه بسیار سمی می‌باشد و این سمیت حتی در غلظت‌های کم نیز وجود دارد (۲۸). امروزه بیشتر زمین‌های کشاورزی در سطح جهان به‌دلیل استفاده درازمدت از کودهای فسفاته، لجن فاضلاب‌ها و سایر منابع آلودگی به غلظت‌های کم تا متوسط کادمیم آلوده شده‌اند. چون گذشته از سایر منابع احتمالی آلاینده، استفاده از فاضلاب شهری در آبیاری محصولات کشاورزی در حومه کلان‌شهرهای ایران روندی رو به افزایش دارد، بنابراین بررسی اثرهای احتمالی این آلودگی بر رشد و خصوصیات فیزیولوژیک گیاهان زراعی حائز اهمیت است. به‌دلیل این‌که کادمیم در سیستم گیاه و خاک متحرک بوده و در آب نیز بسیار محلول است، به آسانی از طریق ریشه جذب و در بافت‌ها تجمع پیدا می‌کند. گفته می‌شود که غلظت کادمیم در اندام‌های گیاهان مختلف از ترتیب ریشه> ساقه> برگ> دانه برخوردار است (۱۳، ۱۵ و ۲۹). مسمومیت کادمیم در بسیاری از گونه‌های گیاهی موجب بازدارندگی و یا خارج شدن گیاه از روند عادی رشد می‌گردد. بعد از این‌که گیاه برای مدت طولانی در معرض آلودگی کادمیم قرار گرفت، ریشه‌ها موسیلاژی، قهوه‌ای و تجزیه شده، رشد طولی ریشه و ساقه کاهش یافته و برگ‌ها لوله‌ای و کلروزه می‌شوند.

بعد از این‌که شکل ریشه‌ها به‌دلیل حضور کادمیم تغییر یافت و رنگ آنها قهوه‌ای شد و سفت و پیچ خورده شدند، رشد جانبی آنها نیز متوقف می‌گردد (۱۸). کادمیم هم‌چنین باعث بازدارندگی رشد ساقه و ریشه شده و باعث از بین رفتن ساختار گرانا، کاهش سنتز کلروفیل و اختلال در جذب عناصر غذایی، تنفس، فتوسنتز، روابط آبی گیاه و در نهایت کاهش تجمع ماده خشک در گیاه می‌گردد (۸ و ۱۷). چن و کائو (۱۱) در مطالعه خود روی برنج، کاهش رشد ریشه در گیاهان تیمار شده با کادمیم را مشاهده کردند. هایات و همکاران (۱۶) گزارش کردند که تنش کادمیم منجر به کاهش وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی در گیاه کلزا شد. سیروکا و همکاران (۲۵) گزارش کردند که تیمار یک میکرومولار کادمیم به‌مدت ۲۴ ساعت باعث کاهش رشد ریشه به میزان ۳۰٪ شد. اقبال و همکاران (۱۷) گزارش کردند که افزایش غلظت کادمیم در محیط کشت گیاه خردل منجر به القای تنش اکسیداتیو و افزایش میزان H_2O_2، کاهش میزان فتوسنتز و در نهایت کاهش رشد گردید.

گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) از جمله قدیمی‌ترین گیاهان زراعی است که توسط بشر مورد کشت و کار قرار گرفته است و در حال حاضر این گیاه در بیش از ۶۰ کشور جهان از جمله ایران، ایالات متحده، هند، مکزیک، شرق دور و نزدیک و شمال آسیا کشت می‌شود (۴). اگرچه طی دو دهه اخیر مطالعات قابل توجهی روی جنبه‌های مختلف زراعی، به‌نژادی و فیزیولوژیک گلرنگ در ایران صورت گرفته (۳ و ۲۲) و اخیراً هم پاسخ ژنوتیپ‌های گلرنگ به فلز سنگین کادمیم در برخی مطالعات مورد توجه قرار گرفته (۲۲)، با این وجود، انجام مطالعات بیشتر به منظور بررسی اثرهای فیزیولوژیک این فلز سنگین بر ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ ضرورت دارد.

هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی میزان تحمل ژنوتیپ‌های گلرنگ در مقابل افزایش میزان کلرید کادمیم در محیط رشد و تأثیر سمیت این عنصر بر برخی پارامترهای مورفولوژیک و فیزیولوژیک این گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در تابستان سال ۱۳۹۱ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان در محیط آبکشت انجام شد. در این آزمایش، سه سطح آلودگی به کادمیم (۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر) به‌علاوه شاهد (بدون آلودگی) به‌عنوان فاکتور اول و شش ژنوتیپ گلرنگ (اراک۲۸۱۱، کوسه، نبراسکا، C_{111}، S_{149} و K_{12}) به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. انتخاب ژنوتیپ‌ها و سطوح کادمیم یاد شده با توجه به یافته‌های مطالعه قبلی (۲۲) که در آن دامنه ژنوتیپ‌ها و سطوح

www.SID.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و غلظت عناصر مورد استفاده در محلول غذایی پایه

ترکیب شیمیایی	غلظت (µmol/l)	عنصر	ترکیب شیمیایی	غلظت (µmol/l)	عنصر
KNO_3	۱۶۰۰۰	N	KCl	۵۰	Cl
$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	۶۰۰۰	K	H_3BO_3	۲۵	B
$NH_4H_2PO_4$	۴۰۰۰	Ca	$MnSO_4.H_2O$	۲	Mn
$MgSO_4.7H_2O$	۲۰۰۰	P	$ZnSO_4.7H_2O$	۲	Zn
	۱۰۰۰	S	$CuSO_4.5H_2O$	۰/۵	Cu
	۱۰۰۰	Mg	$H_2MoO_4(85\%MoO_3)$	۰/۵	Mo
			Fe-EDTA	۵۰	Fe

کادمیم مورد استفاده گسترده‌تر بود انجام گرفت.

بذرهای مورد نظر قبل از کشت در جعبه نشاکاری، با محلول قارچ کش ضدعفونی شدند. شن مورد استفاده جهت بستر کشت نیز قبل از استفاده با اسید کلریدریک رقیق و سپس چند بار با آب مقطر شسته شد تا عاری از هر گونه قارچ و عناصر غذایی باشد. سپس، بذرهای مورد نظر در جعبه نشاکاری محتوی شن کشت شدند. نشاها به‌طور منظم و روزانه با آب مقطر آبیاری شدند. محلول غذایی پایه براساس فرمول جانسون (۱۸) تهیه شد. ترکیب شیمیایی نمک‌های مورد استفاده و غلظت نهایی عناصر در جدول ۱ نشان داده شده است. محلول غذایی تهیه شده در ظروف پلاستیکی پنج لیتری ریخته شده و به منظور جلوگیری از ورود نور به محلول، اطراف ظروف با پلاستیک مشکی ضخیم پوشانده شد.

پس از گذشت دو هفته از کاشت بذرها، نشاها در مرحله دو برگی به محلول غذایی منتقل شدند. هوادهی ریشه‌ها به‌طور منظم هر روز انجام شد. pH محلول‌ها نیز به‌طور منظم اندازه‌گیری شده و در صورت کاهش یا افزایش آن، به‌ترتیب به‌وسیله اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم، pH در محدوده ۵/۷ تا ۶ نگه داشته شد. به منظور حفظ غلظت، نمک سطح آب هر واحد آزمایشی در طول آزمایش با آب مقطر ثابت نگه‌داشته شد. هم‌چنین، به منظور حفظ غلظت مواد غذایی، محلول غذایی هر دو هفته یکبار تعویض شد. دمای متوسط ماهانه در گلخانه پژوهشی برای ماه‌های مرداد و شهریور (کل دوره آزمایش) به‌ترتیب ۲۹/۸ و ۲۸/۵ درجه سلسیوس بود.

با گذشت ۳۹ روز از اعمال تنش و پس از آن‌که علائم ظاهری اثر تنش مشهود گشت (گیاهان در آستانه ورود به مرحله تکمه‌دهی بودند)، گیاهان مورد نظر از محلول غذایی خارج شده و بخش هوایی و ریشه آنها از هم جدا و صفاتی چون حجم ریشه، طول ریشه، وزن تر ریشه و شاخساره اندازه‌گیری شد. بخش هوایی و ریشه هر گیاه به‌صورت مجزا و به‌مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و سپس نمونه‌های خشک شده توزین و آسیاب گردید. نمونه‌های آسیاب شده از شاخساره و ریشه درون کروزه‌های چینی قرار داده شدند. نمونه‌های گیاهی به‌مدت دو ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس کورهٔ الکتریکی به خاکستر تبدیل شده و با استفاده از اسید کلریدریک ۲ نرمال هضم انجام شد. محلول هضم شده از کاغذ صافی واتمن (شماره ۴۲) عبور داده شد و با استفاده از آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. غلظت کادمیم عصاره‌های گیاهی به‌وسیله دستگاه جذب اتمی پرکین المر (مدل AA 200) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری غلظت کادمیم صرفاً به سطح شاهد و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر محدود گشت.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و رسم نمودارها با نرم‌افزار اکسل، نسخه ۲۰۱۰ انجام شد. هم‌چنین، میانگین صفات اندازه‌گیری شده، با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵٪ مقایسه شد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس برای تعداد برگ در بوته، طول ریشه و حجم ریشه شش ژنوتیپ گلرنگ تحت سطوح مختلف کادمیم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		تعداد برگ	طول ریشه	حجم ریشه
بلوک	۲	۱/۷۹^{ns}	۱/۹۴^{ns}	۲/۴۳^{ns}
کادمیم	۳	۱۰۸/۹۳**	۱۷۰۸/۹**	۹۱۷/۵۰**
ژنوتیپ	۵	۲/۸۲^{ns}	۶/۷۲**	۱۴/۳۵**
کادمیم×ژنوتیپ	۱۵	۱/۱۷^{ns}	۰۴/۹۶**	۱/۴۸**
خطای آزمایشی	۴۶	۱/۶۴	۰/۸۶	۰/۷۶

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی‌دار

نتایج و بحث

تعداد برگ در گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر کادمیم بر تعداد برگ در بوته در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۲). سطح شاهد با میانگین ۱۵/۳۸ برگ بیشترین و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم با میانگین ۹/۶۱ کمترین تعداد برگ را دارا بود. سطح ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم باعث کاهش ۱۷/۶ درصدی تعداد برگ در بوته شد (جدول ۳). بهتاش و همکاران (۲) در مطالعه خود نشان دادند که کاربرد کلرید کادمیم باعث کاهش معنی‌دار تعداد برگ در چغندر لبویی شد.

بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از لحاظ تعداد برگ در بوته تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، هم‌چنین، اثر متقابل کادمیم و ریشه برای تعداد برگ در بوته نیز معنی‌دار نشد (جدول ۲).

طول ریشه

اثر کادمیم بر طول ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین سطوح مختلف کادمیم از لحاظ طول ریشه اختلاف معنی‌داری وجود دارد. به گونه‌ای که سطح شاهد با میانگین ۳۵/۴۵ سانتی‌متر بیشترین و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم با میانگین ۱۳/۷۴ سانتی‌متر کمترین طول ریشه را داشت (جدول ۳). بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه به لحاظ میانگین طول ریشه در سطح احتمال ۱٪ اختلاف معنی‌داری وجود داشت. اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ نیز برای طول ریشه معنی‌دار شد (جدول ۲). ژنوتیپ کوسه با کاهش ۶۶/۲ درصدی و ژنوتیپ C_{111} با کاهش ۵۷/۷ درصدی به‌ترتیب بیشترین و کمترین کاهش طول ریشه را تحت غلظت ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم نشان دادند (شکل ۱). بنابراین، به نظر می‌رسد ژنوتیپ C_{111} حساسیت کمتری به لحاظ رشد طولی ریشه نسبت به سایر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه دارد.

غلظت زیاد کادمیم هم‌چنین باعث کاهش رشد سلول نیز می‌گردد. کادمیم از طریق آسیب بر آنزیم‌های کلیدی که در مسیرهای مختلف متابولیک نقش دارند به رشد، طویل شدن و متابولیسم سلول‌های گیاهی آسیب می‌رساند (۷). سان و همکاران (۲۶) در مطالعه خود روی گیاه *Oenothera odorata* نتایج مشابهی را به‌دست آوردند. فینگر و همکاران (۱۳) نیز با بررسی اثر کادمیم بر سویا مشاهده کردند که اعمال تیمار ۱۰۰ میکرومولار کادمیم باعث کاهش ۶۸/۵ درصدی طول ریشه شد.

حجم ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کادمیم بر حجم ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) نشان می‌دهد که اعمال تیمارهای ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم به‌ترتیب منجر به کاهش ۳۷/۱۵، ۵۷/۵۱ و ۷۱/۸۵ درصدی در حجم ریشه گیاهان مورد مطالعه نسبت به سطح شاهد شد.

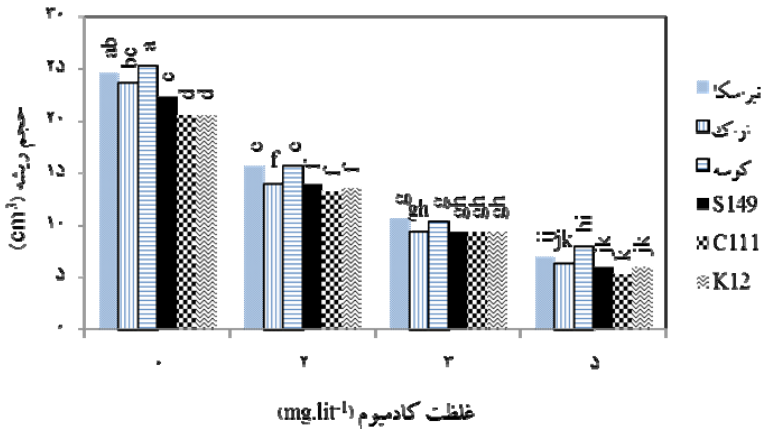
www.SID.ir

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های برخی ویژگی‌ها و غلظت کادمیوم شاخساره و ریشه شش ژنوتیپ گلرنگ تحت سطوح مختلف کادمیوم

عامل آزمایشی	طول ریشه (cm)	تعداد برگ	حجم ریشه (cm^3)	وزن برگ	وزن ساقه	وزن خشک شاخسار	وزن خشک ریشه	غلظت کادمیوم شاخساره	غلظت کادمیوم ریشه
				(gr/plant)				(mg/kg DW)	
کادمیوم (mg/L)									
شاهد	۳۵/۴۵^{a}	۱۵/۳۸^{a}	۲۲/۸۸^{a}	۵/۶۴^{a}	۸/۶۱^{a}	۰/۷۵^{a}	۰/۱۴۶^{a}	۰/۱۹^{a}	۰/۶۲^{b}
۱/۵	۲۵/۸۲^{b}	۱۲/۶۶^{b}	۱۴/۳۸^{b}	۲/۳۶^{b}	۳/۸۰^{b}	۰/۳۸^{b}	۰/۱۰۶^{b}	-	-
۳	۱۶/۹۸^{c}	۱۱/۱۶^{c}	۹/۷۲^{c}	۱/۸۲^{c}	۲/۸۸^{c}	۰/۳۳^{b}	۰/۰۸۱^{c}	-	-
۴/۵	۱۳/۷۴^{d}	۹/۶۱^{d}	۶/۴۴^{d}	۱/۴۷^{d}	۱/۹۹^{d}	۰/۳۲^{b}	۰/۰۶۳^{d}	۹/۸۶^{b}	۹۷/۴۶^{a}
LSD(٪۵)	۰/۶۲	۰/۸۶	۰/۵۸	۰/۵۳	۰/۵۹	۰/۱۱	۰/۰۱۴	۰/۰۷	۰/۸۸
ژنوتیپ									
نبراسکا	۲۳/۳۵^{a}	۱۱/۹۶^{ab}	۱۴/۵۰^{a}	۲/۷۷^{a}	۴/۳۹^{a}	۰/۵۴^{a}	۰/۱۱۲^{a}	۴/۸۱^{c}	۴۴/۰۵^{d}
اراک	۲۳/۱۷^{ab}	۱۱/۶۶^{b}	۱۳/۳۳^{b}	۲/۷۷^{a}	۴/۱۹^{a}	۰/۴۳^{a}	۰/۱۰۵^{ab}	۴/۸۷^{c}	۴۵/۷۵^{c}
کوسه	۲۳/۵۷^{a}	۱۲/۹۱^{a}	۱۴/۸۳^{a}	۳/۱۷^{a}	۴/۳۳^{a}	۰/۴۶^{a}	۰/۱۰۲^{ab}	۴/۷۵^{c}	۴۵/۴۷^{cd}
S_{149}	۲۳/۶۷^{a}	۱۱/۹۱^{ab}	۱۲/۹۱^{bc}	۲/۷۲^{a}	۴/۷۱^{a}	۰/۴۴^{a}	۰/۰۹۳^{b}	۵/۱۲^{b}	۵۳/۸۰^{a}
C_{111}	۲۱/۷۳^{c}	۱۲/۱۶^{ab}	۱۲/۱۶^{d}	۲/۷۵^{a}	۴/۱۳^{a}	۰/۴۲^{a}	۰/۰۹۲^{b}	۵/۲۴^{ab}	۵۰/۵۴^{b}
K_{12}	۲۲/۴۹^{bc}	۱۲/۶۶^{ab}	۱۲/۴۱^{cd}	۲/۷۷^{a}	۴/۱۷^{a}	۰/۴۱^{a}	۰/۰۹۰^{b}	۵/۳۶^{a}	۵۴/۶۴^{a}
LSD(٪۵)	۰/۷۶	۱/۰۵	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۱۳	۰/۰۱۷	۰/۱۳	۱/۵

در هر ستون و برای هر عامل آزمایشی، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

www.SID.ir



شکل ۱. نمودار اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای حجم ریشه. میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

مسمومیت کادمیم باعث کاهش میزان فتوسنتز و به‌دنبال آن کاهش رشد شاخ و برگ و ریشه و به‌ویژه عدم تشکیل ریشه‌های جانبی می‌شود و در نهایت حجم ریشه کاهش می‌یابد (۶ و ۱۵).

تفاوت بین ژنوتیپ‌های مختلف به لحاظ حجم ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد. هم‌چنین، اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ در سطح احتمال ۵٪ برای حجم ریشه معنی‌دار شد (جدول ۲). کمترین کاهش حجم ریشه از سطح شاهد به سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم در ژنوتیپ کوسه (۶۸/۴ درصد) و بیشترین کاهش در ژنوتیپ C_{111} (۷۴/۲ درصد) مشاهده شد (شکل ۲). تأثیر کمتر کادمیم بر حجم ریشه ژنوتیپ کوسه نشان دهنده تحمل بیشتر آن به سمیت کادمیم است.

وزن تر برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر کادمیم بر وزن تر برگ در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۴). سطح شاهد با میانگین ۵/۶۴ گرم در گیاه بیشترین و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم با میانگین ۱/۴۷ گرم در گیاه کمترین وزن خشک برگ را داشت (جدول ۳).

کادمیم سبب به هم خوردن تعادل عناصر غذایی و کاهش در جذب برخی عناصر پرمصرف مانند فسفر و نیتروژن شده و به دنبال آن سبب کاهش رشد و گسترش سلول‌های گیاهی می‌گردد (۲۷). کلروز و کاهش رشد در مطالعه حاضر از مهم‌ترین آثار سمیت کادمیم بود.

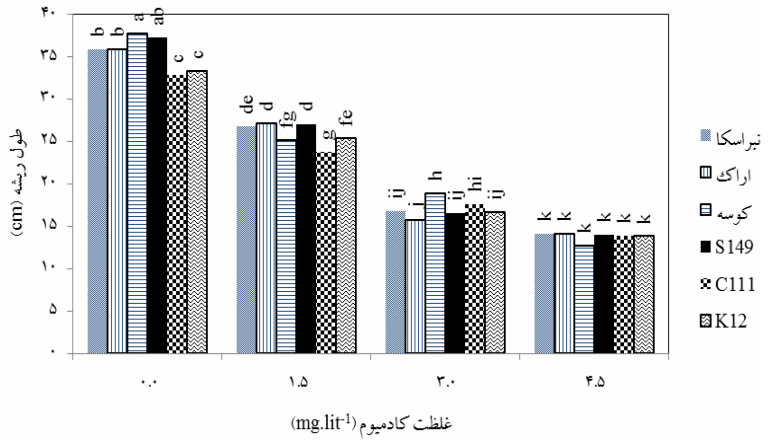
ژنوتیپ‌های گلرنگ مورد مطالعه در این پژوهش از لحاظ وزن تر برگ اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند. هم‌چنین، اثر متقابل ژنوتیپ و کادمیم نیز برای وزن تر برگ معنی‌دار نشد (جدول ۳).

وزن تر ساقه

تأثیر کادمیم بر وزن تر ساقه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین اثرهای اصلی نشان داد که بین سطوح مختلف کادمیم و سطح شاهد اختلاف معنی‌داری از لحاظ وزن تر ساقه وجودد داشت. به گونه‌ای که سطح شاهد با میانگین ۸/۶۱ گرم در گیاه بیشترین و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم با وزن ۱/۹۹ گرم در بوته کمترین وزن تر ساقه را داشت (جدول ۳).

بین ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ در این خصوص اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. هم‌چنین، اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای وزن تر ساقه معنی‌دار نشد (جدول ۴)، که بیانگر تأثیر یکسان سطوح مختلف کادمیم بر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه است.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. نمودار اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای طول ریشه. میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس وزن تر برگ، ساقه و وزن خشک شاخساره و ریشه شش ژنوتیپ گلرنگ تحت سطوح مختلف کادمیم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن تر برگ	وزن تر ساقه	وزن خشک شاخساره	وزن خشک ریشه
بلوک	۲	۱/۷۶^{ns}	۰/۳۳^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۱۳**
کادمیم	۳	۶۵/۸۲**	۱۵۷/۲۳**	۰/۷۶**	۰/۰۲۲۸**
ژنوتیپ	۵	۰/۳۴^{ns}	۰/۵۶^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۸**
کادمیم× ژنوتیپ	۱۵	۰/۴۲^{ns}	۰/۸۸^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۱^{ns}
خطای آزمایشی	۴۶	۰/۶۴	۰/۷۸	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی‌دار

وزن خشک شاخساره

اثر کادمیم بر وزن خشک شاخساره گیاه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۴). تیمار شاهد با میانگین ۰/۷۵ گرم در بوته بیشترین و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم با میانگین ۰/۳۲ گرم در بوته کمترین وزن خشک را دارا بودند. سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم موجب ۵۷/۳ درصد کاهش در وزن خشک شاخساره گیاه نسبت به سطح شاهد شد (جدول ۳).

لیو و همکاران (۱۹) نشان دادند که کاربرد ۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، وزن خشک شاخساره دو رقم برنج را کاهش داد. نجیمی و داوود (۲۱) نیز در مطالعه خود روی گیاه آتریپلکس کاهش ۵۴ درصدی وزن خشک شاخساره در تیمار کادمیم با غلظت زیاد در مقایسه با سطح شاهد را گزارش کردند.

بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی به لحاظ وزن خشک شاخساره تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. با این وجود، ژنوتیپ نبراسکا با میانگین ۰/۵۴ گرم در بوته بیشترین و ژنوتیپ K_{12} با میانگین ۰/۴۱ گرم در بوته کمترین وزن خشک را دارا بودند (جدول ۳). هم‌چنین، اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای وزن خشک شاخساره معنی‌دار نشد (جدول ۵).

وزن خشک ریشه

اثر کادمیم بر وزن خشک ریشه گیاه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۴). تیمار شاهد با میانگین۰/۱۴۶ گرم در

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس غلظت کادمیم ریشه و شاخساره شش ژنوتیپ گلرنگ تحت سطوح مختلف کادمیم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		غلظت کادمیم ریشه	غلظت کادمیم شاخساره
بلوک	۲	۱/۵۷^{ns}	۰/۰۰۶^{ns}
کادمیم	۱	۸۴۳۹۳/۱۵**	۸۴۰/۴۲**
ژنوتیپ	۵	۱۲۵/۵۵**	۰/۳۷**
کادمیم× ژنوتیپ	۵	۱۲۰/۸۹**	۰/۲۶**
خطای آزمایشی	۲۲	۱/۶۲	۰/۰۱

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیرمعنی‌دار

بوته بیشترین و سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم با میانگین ۰/۰۶۳ گرم در بوته کمترین وزن خشک را دارا بودند. سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیم موجب ۵۶/۸ درصد کاهش در وزن خشک ریشه گیاه نسبت به سطح شاهد شد (جدول ۳).

یکی از دلایل کاهش وزن خشک به واسطه حضور فلزات سنگین، به کاهش مقدار پتانسیل نسبی آب گیاه نسبت داده می‌شود. قرار گرفتن در معرض مقادیر زیاد کادمیم می‌تواند سبب اختلال در جریان آب در داخل گیاه شده و موجب آسیب به ریشه گردد. در مطالعه حاضر، ریشه‌ها در اثر به‌کارگیری تیمار کادمیم تغییر شکل داده و قهوه‌ای شدند.

نتایج حاصل از مطالعه پورقاسمیان و همکاران (۲۲) روی تأثیر کادمیم بر گلرنگ نیز با نتایج حاصل از این مطالعه مطابقت دارد. در مطالعه نجیمی و داوود (۲۱)، تیمار ۴۰۰ میکرومولار کادمیم نسبت به سطح شاهد سبب کاهش وزن خشک ریشه گیاه آتریپلکس به میزان ۶۷٪ شد. آندون و همکاران (۵) نیز در مطالعه خود روی گیاه ذرت، کاهش ۱۸ درصدی وزن خشک ریشه در تیمار ۲۵ میکرومولار کادمیم در مقایسه با سطح شاهد را گزارش کردند.

تأثیر ژنوتیپ بر وزن خشک ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار گردید (جدول ۴). به‌طوری‌که ژنوتیپ نبراسکا با میانگین ۰/۱۱۲ گرم در بوته بیشترین و ژنوتیپ K_{12} با میانگین ۰/۰۹ گرم در بوته کمترین وزن خشک را دارا بودند. بین ژنوتیپ‌های اراک، کوسه، S_{149}، C_{111} و K_{12} از نظر وزن خشک ریشه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ بر وزن خشک ریشه معنی‌دار نشد، که بیانگر تأثیر یکسان سطوح کادمیم بر وزن خشک ریشه ژنوتیپ‌های گلرنگ است (جدول ۴).

غلظت کادمیم در شاخساره

اثر کادمیم بر میزان کادمیم شاخساره در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد که غلظت کادمیم شاخساره در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه کمتر از غلظت این عنصر در ریشه بود. نان و همکاران (۲۰) نیز در پژوهشی، تأثیر کادمیم بر گندم بهاره را بررسی کرده و در نتیجه‌ای مشابه، غلظت کمتر کادمیم در اندام‌های هوایی گیاه نسبت به ریشه را گزارش کردند. گیاهان دارای سازوکارهای فیزیولوژیک هستند که از تجمع کادمیم در قسمت هوایی گیاه جلوگیری می‌کنند. به‌طور مثال، در بسیاری از گیاهان، با تشکیل کمپلکس بین کادمیم و پپتیدهای موجود در غشای ریشه، گیاه از انتقال این عنصر به شاخسار ممانعت می‌کند (۱۰).

بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی از نظر میزان کادمیم شاخساره تفاوت معنی‌داری وجود داشت. اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ نیز برای میزان کادمیم در شاخساره معنی‌دار شد (جدول ۵)، که بیانگر وجود تفاوت محسوسی در ژنوتیپ‌ها از لحاظ کادمیم است. ژنوتیپ کوسه با ۶۶/۷۸ برابر و ژنوتیپ

www.SID.ir

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای غلظت کادمیم شاخساره (mg/kg DW) شش ژنوتیپ گلرنگ

کادمیم (mg/L)	نبراسکا	اراک	کوسه	S_{149}	C_{111}	K_{12}
شاهد	^{f}۰/۱۷	^{f}۰/۱۶	^{f}۰/۱۴	^{f}۰/۲۱	^{f}۰/۲۳	^{f}۰/۲۵
۴/۵	^{ed}۹/۴۴	^{d}۹/۵۹	^{e}۹/۳۵	^{c}۱۰/۰۳	^{b}۱۰/۲۶	^{a}۱۰/۴۷

میانگین‌هایی که داری حداقل یک حرف مشترک هستند براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای غلظت کادمیم در ریشه (mg/kg DW) شش ژنوتیپ گلرنگ

کادمیم (mg/L)	نبراسکا	اراک	کوسه	S_{149}	C_{111}	K_{12}
شاهد	^{e}۰/۵۲	^{e}۰/۵۹	^{e}۰/۵۵	^{e}۰/۷۲	^{e}۰/۶۶	^{e}۰/۷۱
۴/۵	^{d}۸۷/۵۸	^{c}۹۰/۹۲	^{c}۹۰/۴	^{a}۱۰۶/۸۷	^{b}۱۰۰/۴۷	^{a}۱۰۶/۵۶

میانگین‌هایی که داری حداقل یک حرف مشترک هستند براساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

K_{12} با ۴۱/۸۸ برابر افزایش به‌ترتیب بیشترین و کمترین افزایش غلظت کادمیم در بخش هوایی را تحت سطح ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر در مقایسه با شاهد نشان دادند (جدول ۶).

غلظت کادمیم در ریشه

تأثیر کادمیم بر میزان کادمیم ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که بخش زیادی از کادمیم جذب شده به‌وسیله گیاهان در ریشه حفظ می‌شود. قابلیت ریشه در تجمع کادمیم جذب شده را می‌توان از طریق مکانیسم‌های متعددی از جمله غیرمتحرک شدن کادمیم در داخل سلول به‌واسطه تشکیل کمپلکس با اسیدهای آلی مانند مالات و اگزالات، پروتئین‌های حمل‌کننده به نام Metallothioneins، تجمع در داخل واکوئل و مسدود شدن به‌وسیله سلول‌های اپیدرمی تشریح کرد (۱۰ و ۱۹). نجیمی و داوود (۲۱) گزارش کردند که ۷۵٪ از کادمیم جذب شده توسط گیاه آتریپلکس در ریشه تجمع پیدا کرده و لذا به بخش هوایی منتقل نشد.

بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی به لحاظ میزان کادمیم ریشه تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳). به‌طوری‌که ژنوتیپ K_{12} با ۵۴/۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک ریشه بیشترین و ژنوتیپ نبراسکا با میانگین ۴۴/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک ریشه کمترین میزان کادمیم در ریشه را در بین ژنوتیپ‌ها داشتند (جدول ۳).

اثر متقابل کادمیم و ژنوتیپ برای میزان کادمیم در ریشه معنی‌دار شد (جدول ۵). به نحوی که ژنوتیپ نبراسکا با ۱۶۸/۴ و ژنوتیپ S_{149} با ۱۴۸/۴ برابر افزایش در میزان تجمع کادمیم در ریشه در مقایسه با سطح شاهد به‌ترتیب بیشترین و کمترین افزایش را تحت سطح ۴/۵ میلی‌گرم کادمیم در لیتر به خود اختصاص دادند (جدول ۷).

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، از نتایج به‌دست آمده می‌توان چنین استنباط کرد که تأثیر کادمیم بر فرآیندهای فیزیولوژیک متفاوت می‌باشد. مسمومیت کادمیم منجر به اختلال در روند عادی رشد و کاهش میزان رشد و تجمع ماده خشک در گیاه و در نهایت کاهش وزن تر و خشک اندام‌های مختلف ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ شد. محل اولیه تجمع کادمیم در این گیاه دانه روغنی در ریشه می‌باشد. تجمع کادمیم در ریشه و ممانعت نسبی از انتقال آن به شاخساره احتمالاً یک مکانیسم تحمل به این فلز سنگین در گلرنگ است. به‌طوری‌که غلظت کادمیم ریشه می‌تواند به ده

Archive of SID

www.SID.ir

برابر غلظت آن در بخش هوایی برسد. شواهدی دال بـر جـذب کمتر کادمیم و حتی انتقال کمتر آن به شاخساره توسط ژنوتیپ-هایی نظیر نبراسکا، اراک و کوسه دیده شد که نیـاز بـه مطالعـه بیشتر را مطرح می‌سازد.

سپاسگزاری

هزینه اجرای این تحقیق توسط دانشگاه صنعتی اصـفهان تـأمین شده است که بدین وسیله قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. اسدی، م.، د. فائزی رازی، ر. نبی‌زاده و م. وجدانی. ۱۳۷۲. مدیریت مواد زائد خطرناک. انتشارات سازمان محیط زیست، تهران.

۲. بهتاش، ف.، س. ج. طباطبایی، م. ج. ملکوتی، م. ح. سرورالدین و ش. اوستان. ۱۳۸۹. اثر روی و کادمیم بر رشد، مقـدار کلروفیـل، فتوسنتز و غلظت کادمیم در چغندر لبویی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) ۱: ۳۱-۴۱.

۳. سبزعلیان، م.، ق. سعیدی و آ. میرلوحی. ۱۳۸۸. بررسی تلاقی‌پذیری و هیبریدهای بـین‌گونـه‌ای حاصـل از تلاقـی گلرنـگ زراعـی (*Carthamus tinctorius* L.) و گلرنگ وحـشی (*Carthamus oxyacantha Bieb*). مجلـه علـوم گیاهـان زراعـی ایـران (علـوم کشاورزی ایران) ۴۰: ۱۷۷-۱۸۵.

۴. محمـــدی، م.، د. محمـــدی، م. اردکـــانی و ا. اصـــغرزاده. ۱۳۸۹. ارزیـــابی قـــدرت جـــذب و انـــدوزش گیـــاه یونجـــه یکـــساله (*Medicago Scutellata*) در خاک‌های آلوده به کادمیم. فصلنامه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی ۳: ۲۴۸-۲۶۰.

5. Andon, V., B. Malgozata, S. Nevena and Z. Zlatko. 2005. Chronic Cd toxicity of bean plants can be partially reduced by supply of ammonium sulphate. Plant Physiol. Biochem. 6: 389-396.
6. Anjum, N.A., S. Umar, A. Ahmad, M. Iqbal and N.A. Khan. 2008. Ontogenic variation in response of *Brassica campestis* L. to cadmium toxicity. J. Plant Interac. 3: 189-198.
7. Baker, A.J.M. and R.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery 1: 81-126.
8. Barbeoch, P.L., N. Leonhard, A. Vavasseur and C. Forestier. 2002. Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. Plant J. 32: 539-548.
9. Barcele, J. and F. Poschenrieder. 1990. Plant water relation as affected by heavy metal stress: A review. J. Plant Nutr. 13: 1-37.
10. Barcelo, J., M. Vazquez and C.H. Poschenrieder. 1988. Structural and ultrastructural disorders in cadmium-treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). New Phytol. 108: 37-49.
11. Chen, S.L. and C.H. Kao. 1995. Cd induced changes in proline level and peroxidase activity in roots of rice seedlings. Plant Growth Regul. 17: 67-71.
12. Dajue, L. and H.H. Mundel. 1996. Safflower: Promoting the conservation and use of under-utilized and neglected crops. IPGRI, Rome, Italy.
13. Finger, A., M.L.L. Ferrarese, A.R. Soares, D.B.D. and O.F. Filho. 2010. Cadmium-iduced lignification restricts soybean root growth. Ecotox. Environ. Safe 73: 1959-1964.
14. Gill, S.S., N.A. Khan and N. Tuteja. 2012. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). Plant Sci. 182: 112-120.
15. Gumao Lima, A.I., S.I. Pereira, E.M. de Almeida Paula Figueira, C. Nunes Caldeira and H.D.Q. De Matos Caldeira. 2006. Cadmium detoxification in roots of *Pisum sativum* seedlings: Relationship between toxicity levels, thiol pool alterations and growth. Environ. Exp. Bot. 55: 149-162.
16. Hayat, S., B. Ali, S.A. Hasan and A. Ahmad. 2007. Brassinosteroid enhanced the level of antioxidants under cadmium stress in *Brassica juncea*. Environ. Exp. Bot. 60: 33-41.
17. Iqbal, N., A. Masood, R. Nazar, S. Syeed and N. A. Khan. 2010. Photosynthesis, growth and antioxidant metabolism in mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars differing in cadmium tolerance. Agric. Sci. China 9: 519-527.
18. Johnson, C.M.A., P.R. Stout, T C. Broyer and A.B. Carlton. 1957. Comparative chlorine requirements of different plants species. Plant Soil 8: 337-353.

Archive of SID
www.SID.ir

19. Liu, J., C. Cao, M. Wong, Z. Zhang and Y. Chai. 2010. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake. J. Environ. Sci. 22: 1067-1072.
20. Nan, Z., J. Li, J. Zhang and G. Cheng. 2002. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions. Sci. Total Environ. 285: 187-195.
21. Nedjimi, B. and Y. Daoud. 2009. Cadmium accumulation in *Atriplex halimus subsp. schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. Flora 204: 316-324.
22. Pourghasemian, N., P. Ehsanzadeh and M. Greger. 2013. Genotypic variation in safflower (*Carthamus spp*.) cadmium accumulation and tolerance affected by temperature and cadmium levels. Environ. Exp. Bot. 87: 218-226.
23. Qadir, S., M.I. Qureshi, S. Javed and M.Z. Abdin. 2004. Genotypic variation in phytoremediation potential of *Brassica juncea* cultivars exposed to Cd stress. Plant Sci. 167: 1171-1181.
24. Singh, S., S. Eapen and S.F.D. Souza. 2006. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant (*Bacopa monnieri* L.). Chemosphere 62: 233-246.
25. Siroka, B., J. Huttova, L. Tamas, M. Simonovicova and I. Mistrik. 2004. Effect of cadmium on hydrolytic enzymes in maize root and coleoptile. Biol. Bratis. 59: 513-517.
26. Son, K.H.D., Y. Kim, N. Koo, K.R. Kim, J.G. Kim and G. Owens. 2012. Detoxification through phytochelatin synthesis in *Oenothera odorata* exposed to Cd solutions. Environ. Exp. Bot. 75: 9-15.
27. Trivedi, S. and L. Erdei. 1992. Effect of cadmium and lead on the accumulation of Ca^{+} and K^{+} and on the influx and translocation of K^{+} in wheat of low and high K^{+} status. Physiol. Plant. 84: 94-100.
28. Vassilev, A. and I. Yordanov. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium-treated plants: A review. Bulg. J. Plant Physiol. 23: 114-133.
29. Wojcik, M., J. Vangronsveld and A. Tukiendorf. 2005. Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*: Growth parameters, metal accumulation and phytochelatin synthesis in response to cadmium. Environ. Exp. Bot. 53: 151-161.

Archive of SID

www.SID.ir