

اثر پیش تیمار سالیسیلیک اسید بر خصوصیات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاهچه‌های ذرت تحت تنش کادمیم

مهدی خورشیدی^۱، میلاد باقری^{۲*}، امین خوشنویسان^۳، معصومه عالمی^۴، بهاره بیچرانلو^۵

۱. استادیار، دانشکده زیست‌شناسی و پژوهشکده علوم زیستی، دانشگاه دامغان؛ ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد زراعت، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ ۳. دانشجو، دانشکده زیست‌شناسی، دانشگاه دامغان؛ ۴. کارشناس ارشد، دانشکده زیست‌شناسی و پژوهشکده علوم زیستی، دانشگاه دامغان؛ ۵. دانشجو کارشناسی ارشد بیماری‌شناسی گیاهی، دانشگاه آزاد اسلامی دامغان.

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۱۰

چکیده

کادمیم یکی از عناصر سمی است که به دلیل قدرت تجمع بالای آن در اندام‌های گیاهی تغییرات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مهمی را در پیکره گیاهان ایجاد می‌نماید. از این رو و به منظور بررسی تأثیر پیش تیمار سالیسیلیک اسید بر کاهش خسارت کلرید کادمیم بر گیاهچه‌های ذرت، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۰ در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه دامغان انجام گردید. آزمایش شامل دو فاکتور کاربرد سالیسیلیک اسید (شامل کاربرد و عدم کاربرد سالیسیلیک اسید) و غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم (شامل صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ میلی مولار) بود. نتایج نشان داد که افزایش غلظت کلرید کادمیم کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنتوسیانین و صفات مورفولوژیک گیاهچه‌های ذرت را در پی داشت. این در حالی بود که میزان مالون دی‌آلدهید، پرولین و ترکیبات فنلی گیاهچه‌های ذرت با افزایش همراه بود. پیش تیمار بذری با سالیسیلیک اسید در مقایسه با عدم کاربرد آن افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنتوسیانین، ترکیبات فنلی، پرولین و صفات مورفولوژیک و کاهش میزان مالون دی‌آلدهید گیاهچه‌های ذرت را به دنبال داشت. کاربرد سالیسیلیک اسید در بالاترین غلظت کلرید کادمیم (۰/۲ میلی مولار) نسبت به عدم کاربرد آن میزان کلروفیل b، کاروتنوئید، ترکیبات فنلی اندام هوایی و ریشه‌چه را به ترتیب ۸/۲۴ درصد، ۱۹/۶۴ درصد، ۲۹/۱۳ درصد و ۴۷/۰۵ درصد بهبود بخشید و باعث کاهش مالون دی‌آلدهید اندام هوایی و ریشه‌چه به ترتیب به میزان ۲۷/۰۴ درصد و ۱۶/۱۹ درصد گردید.

واژه‌های کلیدی: پرولین، رنگیزه‌های فتوسنتزی، پرایمینگ، پراکسیداسیون لیپیدی.

مقدمه

ذخیره گردد. به این ترتیب خاک‌های آلوده به کادمیم یک مشکل زیست محیطی بوده و پالایش آن‌ها به یک راه حل موثر و مقرون به صرفه نیاز دارد. در این میان گیاه پالایی یکی از روش‌هایی است که پیشنهاد می‌گردد (Nascimento and Xing, 2006). گیاه پالایی موثر متکی بر تجمع فلزات در بخش هوایی گیاهانی است که بیومس بالایی تولید می‌کنند (Mcgrath and Zhao, 2003)، و در عین حال مکانیسم‌های مقاومتی موثری در برابر فلزات سنگین دارند (Tong et al., 2004). تأثیرات سمی کادمیم بر گیاهان شامل تغییراتی در سطح ژنتیکی،

کادمیم یکی از سمی‌ترین و شایع‌ترین فلزات در خاک است. عامل عمده تولید کننده کادمیم در محیط، فعالیت‌های صنعتی و استخراج معادن می‌باشد. این فلز نسبت به سایر عناصر سمی بیشترین انتشار در خاک‌ها را در سطح جهانی دارد (Alloway, 1999). عمده‌ترین راه‌های ورود کادمیم به خاک‌های کشاورزی از طریق استفاده از فاضلاب‌ها، مصرف وسیع حشره کش‌ها و کودها می‌باشد (McLaughlin and Singh, 1999). این مسئله سبب نگرانی است، زیرا کادمیم می‌تواند توسط گیاهان جذب شده و در انسان و حیوانات از طریق زنجیره غذایی

رقم سینگل کراس ۶۰۴ تحت سمیت کادمیم، آزمایشی به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۰ در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه دامغان اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل سالیسیلیک اسید (کاربرد و عدم کاربرد) و غلظت‌های کلرید کادمیم (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ میلی مولار) بودند. قبل از انجام آزمایش بذرها به وسیله محلول یک درصد هیپوکلرید سدیم به مدت بیست ثانیه ضدعفونی شده و بعد از آن سه بار با آب مقطر شستشو گردید؛ سپس بذرها درون پتری دیش‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر حاوی ۱۵ میلی لیتر آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار روز در انکوباتور نگهداری شدند. به منظور اعمال سالیسیلیک اسید، قبل از افزودن آب مقطر بذور به مدت ۲۴ ساعت در محلول ۰/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید (۵ میلی‌لیتر محلول به ازای هر گیاهچه) قرار گرفتند. پس از طی چهار روز، گیاهچه‌های یکسان جداسازی شده و به گلدان‌هایی با قطر ۲۰ سانتی‌متر که حاوی ۱/۵ لیتر ماده غذایی هوگلند به همراه غلظت‌های نامبرده کلرید کادمیم بودند منتقل شدند. گیاهچه‌ها به مدت یک هفته در اتاقک رشد در فتوپریود ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی با دمای روزانه ۲۷ درجه سانتی‌گراد و دمای شبانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و در این مدت جهت هوادهی از پمپ آکواریوم استفاده شد. پس از طی این مدت گیاهچه‌ها برداشت شده و صفاتی مانند طول و وزن اندام هوایی و ریشه‌چه، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل a، b، کاروتنوئید و کلروفیل کل در اندام هوایی و میزان تولید مالون دی‌آلدهید (پراکسیداسیون لیپیدی)، پرولین، ترکیبات فنلی و آنتوسیانین‌ها در اندام هوایی و ریشه‌چه اندازه‌گیری شدند. به منظور تعیین وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت، نمونه‌ها در آون و در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک گردید. برای سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش لیچنتن‌تالر (Lichtenthaler, 1987)، میزان آنتوسیانین‌های برگ از روش وانگر (Wanger, 1976) و اندازه‌گیری میزان ترکیبات فنلی از روش گائو (Gao, 2000) استفاده گردید. مالون دی‌آلدهید (MDA) که شاخص پراکسیداسیون لیپیدی در طی تنش‌هاست به روش هیث و پارکر (Heath and Parker, 1968) و میزان پرولین به روش بیتز و همکاران (Bates et al., 1973) اندازه‌گیری شد.

بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی است که بیشترین نشانه‌های آن کاهش رشد گیاهان و حتی مرگ آن‌ها (Sandalio et al., 2001; Drazkiewicz et al., 2003) است. تخریب سیستم فتوسنتزی از طریق تجزیه کلروفیل (Sandalio et al., 2001)، غیر فعال کردن آنزیم‌های تثبیت کننده دی‌اکسید کربن (Greger and Ogren, 1991) و همچنین تغییر در میزان پرولین (Sharma and Diets, 2006)، گونه‌های فعال اکسیژن و فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت (Sandalio et al., 2001) می‌باشد. در واقع یکی از مکانیسم‌های اصلی سمیت فلزات سنگین در گیاهان تنش اکسیداتیو و افزایش گونه‌های آزاد اکسیژن است که شدت آن توسط اندازه‌گیری میزان افزایش مالون دی‌آلدهید مورد بررسی قرار می‌گیرد (Kalantari and Oloumi, 2005).

سالیسیلیک اسید یک ماده شبه هورمونی است که بر فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تأثیر داشته و در رشد و تولید آن‌ها نقش کلیدی دارد (Arberg, 1981). اسید سالیسیلیک به عنوان یک مولکول پیام رسان مهم در پاسخ‌های گیاه به تنش‌های متعدد زیستی و غیر زیستی شناخته شده است (El-Tayeb, 2005; Horvath et al., 2007). این ماده با تأثیر بر آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و پراکسیداز و تنظیم کننده‌های اسمزی مانند پرولین و گلیسین بتائین آثار ناشی از تنش‌ها را کاهش می‌دهد (Senaranta et al., 2002). در بسیاری از گزارشات به نقش سالیسیلیک اسید در تعدادی از پاسخ‌های دفاعی به تنش‌های محیطی مانند دماهای پایین (Kang and Chen, 2003; Tasgin et al., 2002; Saltveit, 2002)، گرما (et al., 1997; Borsani et al., 2001)، فلزات سنگین (Shi et al., 1999; Mishra and Choudhuri, 2009)، اشعه ماوراء بنفش و ازون (Sharma et al., 1996; Alvarez, 2000; Durner et al., 1997) و خشکی (Senaranta et al., 2002) اشاره شده است. این تحقیق با هدف بررسی امکان افزایش تحمل و بهبود خصوصیات گیاهچه‌های ذرت تحت تنش کادمیم با استفاده از پیش تیمار بذر با سالیسیلیک اسید از طریق کاهش ترکیبات مضر انجام گردیده است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر پیش تیمار سالیسیلیک اسید بر خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاهچه‌های ذرت

در حالی که میزان کلروفیل b متأثر از اثر ساده کاربرد سالیسیلیک اسید و غلظت‌های کلرید کادمیم و نیز اثر متقابل آن‌ها بود (جدول ۱). بیشترین غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل مربوط به تیمارهای کاربرد سالیسیلیک اسید بود. کاربرد سالیسیلیک اسید باعث افزایش ۵/۷۳ درصدی کلروفیل a و ۹/۸۶ درصدی کلروفیل کل گردید (جدول ۲). در آزمایشی مبنی بر بررسی سالیسیلیک اسید بر رشد و عملکرد ذرت تحت تنش خشکی بیان شده است که اعمال سالیسیلیک اسید افزایش به طور متوسط ۲۰ درصدی کلروفیل ذرت را در پی داشته است (Mehrabiyani Moghadam et al., 2011).

در پایان داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم-افزار SAS (ver. 9.2) تجزیه واریانس شدند. مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن و با استفاده از نرم افزار MSTAT-C انجام شد. به منظور رسم نمودارها نیز از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

صفات فیزیولوژیک اندام هوایی و ریشه‌چه

رنگیزه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که میزان کلروفیل a و کلروفیل کل تنها تحت تأثیر اثر ساده دو فاکتور قرار گرفت،

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) آنتوسیانین و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهچه‌های ذرت.

Table 1. Analysis of variance of anthocyanin and photosynthesis pigments of maize seedlings.

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی	آنتوسیانین / Anthocyanin					
			کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	ریشه‌چه	
		df.	Chl. a	Chl. b	Total Chl.	Carotenoid	Shoot	Radicle
سالیسیلیک اسید		1	0.012105*	0.028981***	0.080041***	0.000301 ^{n.s.}	0.67***	0.119***
غلظت کادمیم		3	0.151291***	0.041228***	0.221310***	0.007592***	0.530437***	0.146381***
اثر متقابل		3	0.000136 ^{n.s.}	0.004217**	0.005765 ^{n.s.}	0.001585**	0.011315 ^{n.s.}	0.001448 ^{n.s.}
اشتباه آزمایشی		16	0.0016228	0.00036	0.002195	0.0001551	0.0140208	0.0014625
Error								
C.V.	ضریب تغییرات	-	5.28	5.53	4.19	5.9	5.75	10.63

*, **, و ***؛ به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ و ^{n.s.} نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار است.

*, **, and ***, significant at 0.05, 0.01 and 0.001 probability level respectively, and n.s. no significant.

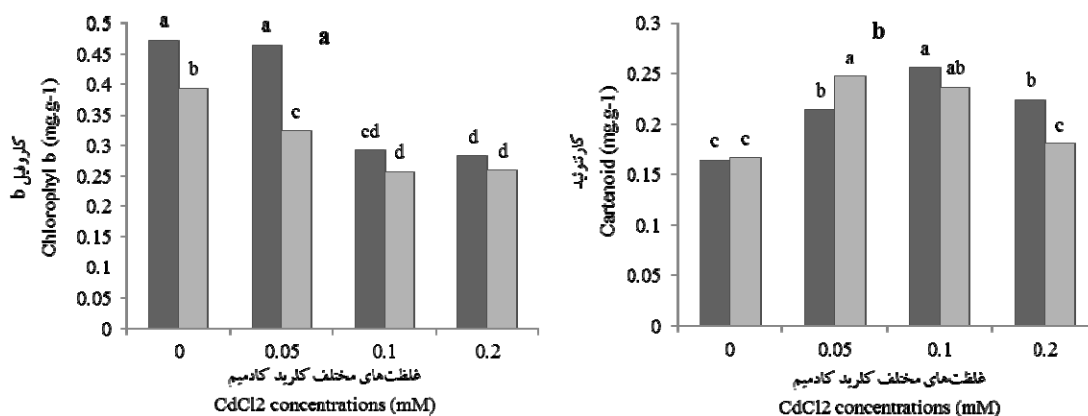
جدول ۲. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد سالیسیلیک اسید بر آنتوسیانین و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهچه‌های ذرت.

Table 2. Mean comparison of salicylic acid levels on anthocyanin and photosynthesis pigments of maize seedlings.

سطوح سالیسیلیک اسید	آنتوسیانین / Anthocyanin				
	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	ریشه‌چه	اندام هوایی
	Chl. a	Chl. b	Total Chl.	Shoot	Radicle
کاربرد سالیسیلیک اسید	0.785 ^a	0.377 ^a	1.176 ^a	2.225 ^a	0.43 ^a
عدم کاربرد سالیسیلیک اسید	0.74 ^b	0.308 ^b	1.06 ^b	1.89 ^b	0.29 ^b
SA application					
SA non-application					

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵٪ اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند.

Means with at least one similar letter, are not significant different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's test.



شکل ۱. تأثیر کاربرد (ستون‌های تیره) و عدم کاربرد (ستون‌های روشن) سالیسیلیک اسید بر کلروفیل b (a) و کاروتنوئید (b) گیاهچه‌های ذرت در غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم. میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

Fig. 1. Effect of application (Black bars) and no application (Gray bars) of salicylic acid on chlorophyll b (a) and carotenoid (b) of Maize seedlings in different CdCl₂ concentrations. Means with same letters are not significantly different at $\alpha = 0.05$ on based of Duncan's test.

تأثیر فلزات سنگین از طریق بازدارندگی دو آنزیم گاما-آمینولولینیک اسید دهیدروژناز و پروتوکلروفیلی در دوکنتاز (Ghorbanli *et al.*, 2007) می‌باشد. این در حالی است که سالیسیلیک اسید از طریق افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو و افزایش کلروفیل، میزان فتوسنتز کل را افزایش می‌دهد (Bayat *et al.*, 2011) و از طریق تأثیر بر میزان تولید رادیکال‌های آزاد از تخریب کلروفیل جلوگیری کرده و افزایش میزان رنگدانه‌ها را به دنبال دارد (Keshavarz *et al.*, 2012). بنابراین استفاده از سالیسیلیک اسید می‌تواند تا حدودی اثرات منفی کلرید کادمیم را بر میزان کلروفیل کاهش دهد. نتایج حاصل از این پژوهش نیز تأثیر سالیسیلیک اسید را بر افزایش میزان کلروفیل b در گیاهچه‌های ذرت تحت تنش کلرید کادمیم تایید می‌نماید (شکل ۱-ا).

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش نشان داد که میزان کاروتنوئید متأثر از اثر ساده غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم و اثر متقابل دو فاکتور قرار داشت (جدول ۱). بیشترین میزان کاروتنوئید مربوط به تیمارهای کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت ۰/۱ میلی مولار کادمیم و عدم کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت ۰/۰۵ میلی مولار کلرید کادمیم بود. سالیسیلیک اسید در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم باعث افزایش میزان کاروتنوئید

بیشترین مقدار کلروفیل a در تیمار ۰/۰۵ میلی مولار کلرید کادمیم و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد بدست آمد که با تیمار ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم اختلاف معنی‌داری نداشت. حداکثر و حداقل غلظت کلروفیل کل به ترتیب مربوط به تیمارهای ۰/۰۵ و ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم بود (جدول ۳). در مطالعه پاسخ شاخص‌های رشدی چغندر لبویی تحت تأثیر کادمیم نیز کاهش مقدار کلروفیل برگ و فتوسنتز خالص و به دنبال آن کاهش عملکرد گیاه گزارش شده است (Behtash *et al.*, 2010).

بیشترین میزان کلروفیل b مربوط به غلظت‌های صفر و ۰/۰۵ میلی مولار کلرید کادمیم در شرایط اعمال سالیسیلیک اسید بود. کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت‌های صفر و ۰/۰۵ میلی مولار کلرید کادمیم در مقایسه با عدم کاربرد آن به ترتیب افزایش ۱۶/۷۹ و ۳۰/۱۹ درصدی میزان کلروفیل b را در پی داشت. کمترین میزان کلروفیل b نیز مربوط به غلظت ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم در شرایط عدم کاربرد سالیسیلیک اسید بود. کاربرد سالیسیلیک اسید در این غلظت نسبت به عدم کاربرد آن میزان کلروفیل b را ۸/۲۴ درصد بهبود بخشید (شکل ۱-ا). از مهم‌ترین دلایل کاهش غلظت کلروفیل تخریب آن‌ها به وسیله گونه‌های اکسیژن فعال (Osareh and Shariat, 2009) و ممانعت از بیوسنتز کلروفیل تحت

(Keshavarz et al., 2012). بنابراین افزایش کاروتنوئیدها در هنگام القای تنش و کاربرد سالیسیلیک اسید می‌تواند ظرفیت آن‌ها را در کاهش خسارت ناشی از رادیکال‌های آزاد افزایش داده و به نوبه خود میزان کلروفیل گیاه را افزایش دهد. در واقع این می‌تواند در نتیجه اثر حفاظتی سالیسیلیک اسید و کاروتنوئیدها به منظور حفاظت دستگاه فتوسنتزی در مقابل تنش اکسیداتیو باشد (Azooz, 2009).

نسبت به شرایط عدم کاربرد سالیسیلیک اسید شد (شکل ۱-ب). نتایج حاصل از آزمایشی مبنی بر تأثیر ترکیبی کادمیم و شوری بر روی دو گیاه *Myriophyllum heterophyllum* Michx. و *Potamogeton crispus* L. نشان داد که میزان کاروتنوئیدهای هر دو گیاه با افزایش غلظت کادمیم و NaCl کاهش می‌یابد (Sivaci and Elmas, 2012). کاروتنوئیدها قادرند انرژی زیاد طول موج‌های کوتاه را گرفته و از طریق جذب رادیکال‌های اکسیژن تولید شده نقش آنتی اکسیدانت خود را بروز دهند

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم بر آنتوسیانین و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهچه‌های ذرت.

Table 3. Mean comparison of cadmium levels on anthocyanin and physiological parameters of maize shoot.

غلظت کلرید کادمیم Cd concentrations (mM)	کلروفیل a Chl. a	کلروفیل b Chl. b	کلروفیل کل Total Chl.	کاروتنوئید Carotenoid	Anthocyanin	آنتوسیانین
					اندام هوایی Shoot	ریشه‌چه Radicle
0	0.636 ^c	0.432 ^a	1.081 ^b	0.165 ^d	1.736 ^d	0.55 ^a
0.05	0.977 ^a	0.394 ^b	1.387 ^a	0.23 ^b	2.383 ^a	0.4 ^b
0.1	0.788 ^b	0.274 ^c	1.074 ^b	0.246 ^a	2.223 ^b	0.28 ^c
0.2	0.649 ^c	0.271 ^c	0.93 ^c	0.202 ^c	1.888 ^c	0.19 ^d

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵٪ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means with at least one similar letter, are not significant different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's test.

میلی مولار و از ۰/۱ به ۰/۲ میلی مولار میزان آنتوسیانین اندام هوایی را به ترتیب ۶/۷۱ درصد و ۱۵/۰۶ درصد کاهش داد. اما به طور کلی در شرایط تنش کادمیم میزان آنتوسیانین‌ها در اندام هوایی نسبت به غلظت صفر (عدم القای کلرید کادمیم) با افزایش مواجه بود (جدول ۳). آنتوسیانین ریشه‌چه نیز با افزایش غلظت کلرید کادمیم کاهش یافت، به طوری که با افزایش هر سطح از کلرید کادمیم میزان آنتوسیانین ریشه‌چه به طور متوسط ۲۸ درصد کاهش داشت (جدول ۳). برخلاف نتایج بدست آمده، در آزمایشی مبنی بر مطالعه تأثیر کادمیم بر کلزا افزایش میزان آنتوسیانین متناسب با افزایش غلظت کادمیم گزارش شده است (Kalantari and Oloumi, 2005).

پراکسیداسیون لیپیدی، پرولین و ترکیبات فنلی

مالون دی آلدهید در اندام هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت تحت تأثیر اثرات ساده و اثر متقابل فاکتورهای آزمایش قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌های حاصل از آزمایش نشان داد که در هر دو سطح سالیسیلیک اسید با

میزان آنتوسیانین در اندام هوایی و ریشه‌چه تنها متأثر از اثرات ساده سالیسیلیک اسید و غلظت کلرید کادمیم بود (جدول ۱). بررسی اثر ساده سالیسیلیک اسید بر میزان آنتوسیانین مشخص کرد که کاربرد این پیش تیمار باعث افزایش آنتوسیانین در اندام هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت می‌شود، به طوری که کاربرد سالیسیلیک اسید میزان آنتوسیانین اندام هوایی و ریشه‌چه را به ترتیب ۱۵/۰۵ درصد و ۳۲/۷۹ درصد افزایش داد (جدول ۲). طبق نتایج حاصل از یک آزمایش، کاربرد سالیسیلیک اسید باعث افزایش معنی‌دار آنتوسیانین‌های ریشه و اندام هوایی گیاه دارویی *Bellis perennis* L. شد و کاهش شدت تنش زیستی حاصل از القای میکروبی را به دنبال داشت (Khavarinejhad et al., 2004). بررسی اثر ساده غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم بر میزان آنتوسیانین نیز نشان داد که بیشترین میزان آنتوسیانین در اندام هوایی مربوط به غلظت ۰/۰۵ میلی مولار کلرید کادمیم و کمترین میزان آن مربوط به غلظت صفر (شاهد) کلرید کادمیم بود (جدول ۳). افزایش غلظت کلرید کادمیم از ۰/۰۵ به ۰/۱

باعث کاهش میزان MDA اندام هوایی نسبت به شرایط عدم کاربرد آن گردید. به طوری که کاربرد سالیسیلیک اسید نسبت به عدم کاربرد آن در غلظت‌های صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ کلرید کادمیم به ترتیب ۹/۴، ۲۳/۷، ۲۶/۴۸ و ۲۷/۰۴ درصد کاهش MDA را در پی داشت (شکل ۲-ا). بنابراین می‌توان این گونه استنباط کرد که سالیسیلیک اسید باعث القای کمتر تنش اکسیداتیو در اندام هوایی ذرت می‌شود.

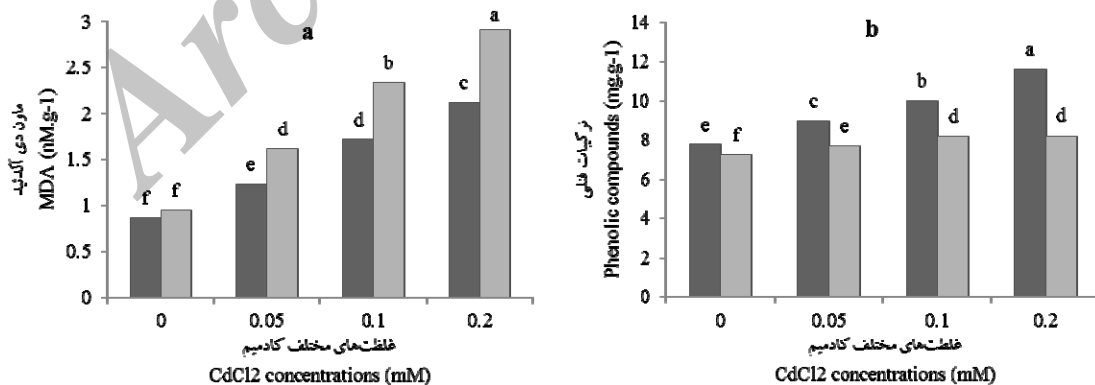
افزایش غلظت کلرید کادمیم میزان MDA افزایش یافت (شکل ۲-ب). افزایش MDA تحت تیمار کادمیم نشان دهنده القای تنش اکسیداتیو توسط کادمیم است و آسیب رسانی این فلز را به ساختار و عمل غشای سلولی از طریق اتصال به پروتئین‌های غشا و آنزیم‌ها تایید می‌نماید (Porakbar and Ashrafi, 2011). افزایش میزان مالون دی آلدید تحت تنش کادمیم در کلزا نیز گزارش شده است (Kalantari and Oloumi, 2005). کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات فیزیولوژیک اندازه گیری شده گیاهچه‌های ذرت.

Table 4. Analysis of variance of physiological parameters in maize seedlings.

S.O.V.	منبع تغییرات آزادی df.	اندام هوایی / shoot			ریشه‌چه / radicle			
		MDA	پرولین Proline	ترکیبات فنلی Phenol	MDA	پرولین Proline	ترکیبات فنلی Phenol	
سالیسیلیک اسید Salicylic acid (A)	1	1.31835***	936.250***	18.1134***	1.302004***	885.735***	16.78353***	
غلظت کادمیم Cd concentration (B)	3	2.96409***	2980.38***	6.43028***	3.602237***	2301.53***	4.01421***	
اثر متقابل Interaction (A×B)	3	0.13748***	6.24708 ^{n.s.}	2.214604***	0.063059**	3.602778 ^{n.s.}	1.40291***	
اشتباه آزمایشی Error	16	0.0086164	18.82208	0.0499375	0.0121125	22.397083	0.0171791	
C.V.	ضریب تغییرات	-	5.4	6.5	2.56	5.83	9.93	3.47

***، ** و * به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطح ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵، n.s. نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار است. *, ** and ***, significant at 0.05, 0.01 and 0.001 probability level respectively, and n.s. no significant.



شکل ۲. تأثیر کاربرد (ستون‌های تیره) و عدم کاربرد (ستون‌های روشن) سالیسیلیک اسید بر مالون‌دی‌آلدید (a) و ترکیبات فنلی (b) اندام هوایی گیاهچه‌های ذرت در غلظت‌های مختلف کادمیم کلرید. میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

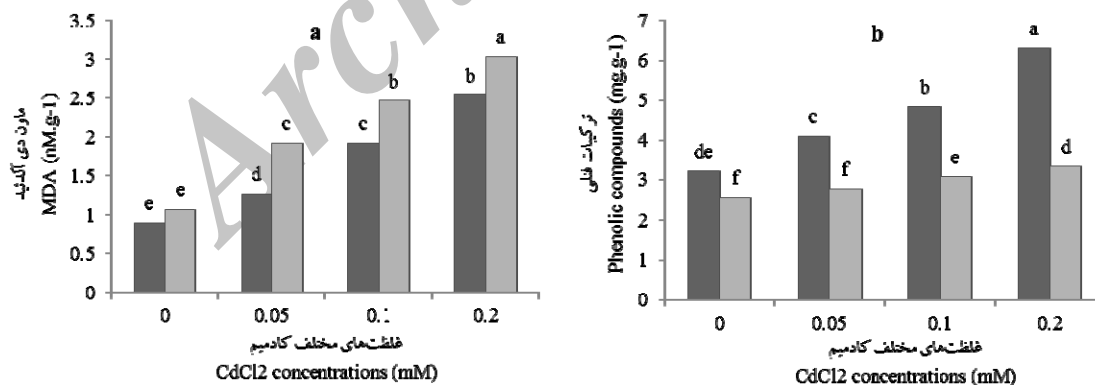
Fig. 2. Effect of application (Black bars) and no application (Gray bars) of salicylic acid on MDA (a) and phenolic compounds (b) of Maize seedlings in different CdCl₂ concentrations. Means with same letters are not significantly different at $\alpha = 0.05$ based of Duncan's test.

نسبت به اندام هوایی آن تحت تنش کادمیم اظهار شده است که آن را پاسخی به تجمع بیشتر کادمیم در ریشه ذرت عنوان کرده‌اند (Porakbar and Ashrafi, 2011). بر خلاف این نتایج، در گزارش دیگری مبنی بر بررسی گیاه پالایی کادمیم توسط تربچه بیشترین میزان تجمع این فلز در اندام هوایی اظهار شده است، که نشان دهنده تجمع میزان MDA بیشتر در اندام هوایی نسبت به ریشه است (Arabi et al., 2011).

میزان ترکیبات فنلی اندام هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت تحت تأثیر اثرات ساده و اثر متقابل فاکتورهای آزمایش قرار داشت (جدول ۴). افزایش غلظت کلرید کادمیم باعث افزایش میزان ترکیبات فنلی در اندام هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت شد (جدول ۶). افزایش این ترکیبات در شرایط تنش مربوط به ساختار ژنتیکی و محیط رشد گیاهان است، در واقع تنش زیستی و غیرزیستی سنتز پلی فرول‌ها را تحت تأثیر قرار داده و باعث تجمع ترکیبات فنلی در گیاه می‌شود. این ترکیبات دارای قدرت رقابت بوده و در فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانتی گیاهان به منظور محدود کردن اثرات فلزات سنگین شرکت می‌کنند (Sivaci and Elmas, 2012).

مطابق با آنچه در بررسی مالون دی‌آلدهید اندام هوایی مشاهده شد، افزایش غلظت کلرید کادمیم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد سالیسیلیک اسید میزان MDA ریشه‌چه را افزایش داد که این افزایش در شرایط کاربرد سالیسیلیک اسید کمتر بود (شکل ۳-ا). بیشترین و کمترین میزان تولید MDA به ترتیب مربوط به شرایط بدون پیش تیمار سالیسیلیک اسید در غلظت ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم و غلظت صفر (شاهد) کلرید کادمیم در شرایط کاربرد سالیسیلیک اسید بود (شکل ۳-ا). در تحقیق دیگری کاهش میزان MDA توسط سالیسیلیک اسید در باقلا تحت شرایط تنش شوری گزارش شده است (Azooz, 2009). در بررسی نقش سالیسیلیک اسید در گیاهچه‌های گندم تحت تنش شوری نیز کاهش میزان MDA در گیاهچه‌های پیش تیمار شده با سالیسیلیک اسید گزارش شده است و دلیل این کاهش پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد و به طبع آن جلوگیری از اکسیداسیون چربی‌ها بیان شده است (Doulatabadian et al., 2008).

در تیمارهای مختلف میزان تجمع MDA در ریشه‌چه ذرت بیشتر از اندام هوایی آن بود (جدول ۵ و ۶، شکل ۳-ا). در گزارش دیگری افزایش میزان MDA در ریشه ذرت



شکل ۳. تأثیر کاربرد (ستون‌های تیره) و عدم کاربرد (ستون‌های روشن) سالیسیلیک اسید بر مالون‌دی‌آلدهید (a) و ترکیبات فنلی (b) ریشه‌چه گیاهچه‌های ذرت در غلظت‌های مختلف کادمیم کلرید. میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار هستند.

Fig. 3. Effect of application (Black bars) and no application (Gray bars) of salicylic acid on MDA (a) and phenolic compounds (b) of Maize root of seedlings in different CdCl₂ concentrations. Means with same letters are not significantly different at $\alpha = 0.05$ on based of Duncan's test.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد سالیسیلیک اسید بر صفات فیزیولوژیک گیاهچه‌های ذرت.

Table 5. Mean comparison of salicylic acid levels on physiological parameters of maize seedlings.

سطوح سالیسیلیک اسید Salicylic acid	اندام هوایی Shoot			ریشه‌چه Radicle		
	MDA	پرولین Proline	ترکیبات فنلی Phenol	MDA	پرولین Proline	ترکیبات فنلی Phenol
کاربرد سالیسیلیک اسید SA application	1.482 ^b	72.95 ^a	9.575 ^a	1.654 ^b	53.708 ^a	4.61 ^a
عدم کاربرد سالیسیلیک اسید SA non-application	1.95 ^a	60.46 ^b	7.838 ^b	2.12 ^a	41.558 ^b	2.93 ^b

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵٪ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.
Means with at least one similar letter, are not significant different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's test.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم بر صفات فیزیولوژیک گیاهچه‌های ذرت.

Table 6. Mean comparison of Cadmium levels on physiological parameters of maize seedlings.

سطوح کادمیم Cd Levels (mM)	اندام هوایی Shoot			ریشه‌چه Radicle		
	MDA	پرولین Proline	ترکیبات فنلی Phenol	MDA	پرولین Proline	ترکیبات فنلی Phenol
0	0.901 ^d	42.58 ^d	7.498 ^d	0.981 ^d	24.61 ^d	2.88 ^d
0.05	1.425 ^c	71.45 ^b	8.321 ^c	1.591 ^c	38.6 ^c	3.43 ^c
0.1	2.021 ^b	95.08 ^a	9.095 ^b	2.193 ^b	67.25 ^a	3.95 ^b
0.2	2.516 ^a	57.73 ^c	9.913 ^a	2.781 ^a	60.06 ^b	4.81 ^a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵٪ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.
Means with at least one similar letter, are not significant different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's test

فنتون^۱ که از مهم‌ترین منابع ایجاد رادیکال‌های آزاد است می‌شود (Michalak, 2006) و می‌تواند از این طریق در کاهش اثرات سو فلزات سنگین ایفای نقش نمایند. میان MDA ریشه‌چه و اندام هوایی رابطه خطی مثبتی با $R^2=0.97$ و رابطه $y = 1.0611x + 0.066$ برقرار بود. میان ترکیبات فنلی ریشه‌چه و اندام هوایی نیز رابطه مثبت خطی با $R^2=0.98$ و رابطه $y = 0.8593x - 3.7092$ مشاهده شد. با توجه به ارتباط بین میزان مالون دی آلدئید و ترکیبات فنلی با تجمع کادمیم در اندام هوایی و ریشه می‌توان به رابطه‌های مثبت بین میزان کادمیم اندام هوایی و ریشه‌چه پی برد. در آزمایشی که به بررسی جذب و توزیع سرب و کادمیم در اندام‌های مختلف چند گونه گیاهی پرداخته است رابطه مثبتی بین تجمع کادمیم در اندام هوایی و ریشه یونجه، لوبیا و چغندر لبویی گزارش شده است. بر اساس این گزارش افزایش مقدار کادمیم در اندام هوایی متناسب با مقدار کادمیم ریشه چه نشان دهنده انتقال کادمیم از طریق آوند آبکش به اندام هوایی و به طبع آن بذر گیاه است (Sekara et al., 2005)

افزایش ترکیبات فنلی در گیاهچه‌هایی که بذور آنها تحت پیش تیمار سالیسیلیک اسید قرار داشت بیشتر بود، به طوری که استفاده از پیش تیمار سالیسیلیک اسید نسبت به عدم استفاده از آن در غلظت ۰/۲ کلرید کادمیم ترکیبات فنلی اندام هوایی و ریشه‌چه را به ترتیب به میزان ۲۹/۱۳ درصد و ۴۷/۰۵ درصد افزایش داد (شکل ۲ و ۳-b). افزایش میزان ترکیبات فنلی تحت تأثیر سالیسیلیک اسید در گیاه مریم گلی نیز گزارش شده است (Dong et al., 2010). حداقل میزان ترکیبات فنلی اندام هوایی و ریشه‌چه مربوط به شرایط عدم استفاده از سالیسیلیک اسید در غلظت صفر کلرید کادمیم و بیشترین میزان آن مربوط به تیمار کاربرد سالیسیلیک اسید در غلظت ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم بود (شکل ۲ و ۳-b). به دلیل این که سالیسیلیک اسید خود از ترکیبات فنلی در گیاهان است و نقش محوری در تنظیم فرایندهای فیزیولوژیکی گیاهان ایفا می‌کند (Mohammadi et al., 2009)، بنابراین افزایش ترکیبات فنلی را نیز در پی دارد. ترکیبات فنلی خارج شده از ریشه، یون‌های آهن را از طریق کلاته کردن غیرفعال کرده و علاوه بر این باعث توقف واکنش سوپراکسید-درایون

¹. superoxide-driven Fenton

حفاظت می‌نماید (Tatar and Gevrek, 2008) و از طریق رفع کمبود آب، کلات کردن عناصر و مهار رادیکال‌های آزاد از خسارت فلزات سنگین جلوگیری می‌نماید (Balestrasse et al., 2005).

صفات مورفولوژیک گیاهچه‌های ذرت

وزن خشک ساقه چه، طول برگ، وزن خشک و طول ریشه‌چه تنها تحت تأثیر اثرات ساده قرار گرفتند. طول ساقه‌چه علاوه بر اثرات ساده تحت تأثیر اثر متقابل دو فاکتور نیز قرار داشت (جدول ۷).

مقایسه میانگین داده‌های حاصل از آزمایش بر این ادعان داشت که کاربرد سالیسیلیک اسید در مقایسه با شرایط عدم کاربرد آن افزایش ۲۳/۶۲ درصدی وزن خشک ساقه‌چه، ۱۰/۷۲ درصدی طول برگ، ۳۱/۴۷ درصدی وزن خشک ریشه‌چه و ۱۷/۱۸ درصدی طول ریشه‌چه را در پی داشت (جدول ۸). سازوکار افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه توسط سالیسیلیک اسید به خوبی شناخته نشده است، اما احتمال داده می‌شود که pH پایین سالیسیلیک اسید و غلظت کم آن می‌تواند با فعال کردن پمپ‌های پروتون غشا موجب افزایش جذب مواد غذایی و فشار اسمزی شده و در نتیجه میزان بیوسنتز و ماده سازی افزایش یابد. همراه با افزایش ماده سازی، pH اسیدی موجب سست شدن دیواره شده و زمینه برای رشد سلول‌ها و افزایش طول فراهم می‌گردد (Mohammadi et al., 2009).

میزان پرولین اندام هوایی و ریشه‌چه تحت تأثیر اثرات ساده سالیسیلیک اسید و غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم قرار گرفت (جدول ۴). در بررسی اثر ساده سالیسیلیک اسید مشخص گردید که کاربرد این پیش تیمار باعث افزایش پرولین در اندام هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت می‌شود. به طوری که کاربرد سالیسیلیک اسید ۱۷/۱۲ درصد افزایش پرولین در اندام هوایی و ۲۲/۶۲ درصد در ریشه‌چه را به دنبال دارد (جدول ۵). بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم بر میزان پرولین نیز نشان داد که بیشترین میزان پرولین در اندام هوایی و ریشه‌چه در غلظت ۰/۱ میلی مولار کلرید کادمیم و کمترین میزان آن در غلظت صفر (شاهد) آن تولید شد. افزایش غلظت کلرید کادمیم تا غلظت ۰/۱ میلی مولار باعث افزایش پرولین در اندام هوایی و ریشه‌چه شد (جدول ۶). افزایش میزان پرولین با افزایش غلظت کادمیم در کاهو (Haghighi et al., 2010)، سویا (Balestrasse et al., 2005) و لوبیا (Zengin and Munzuroglu, 2005) نیز گزارش شده است. افزایش غلظت کلرید کادمیم از ۰/۱ میلی مولار به ۰/۲ میلی مولار میزان پرولین در اندام هوایی و در ریشه‌چه را به ترتیب ۳۹/۲۸ درصد و ۱۰/۶۸ درصد کاهش داد (جدول ۶). به عنوان یک نتیجه کلی، همزمان با افزایش غلظت عناصر سنگین، ترکیبات نیتروژن دار مانند پرولین افزایش یافته و افزایش پروتئین را نیز در پی خواهد داشت (Singh and Malik, 2011). از سوی دیگر پرولین به واسطه تنظیم اسمزی غشای سلولی را در برابر اکسیداسیون

جدول ۷. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورفولوژیک اندازه گیری شده در گیاهچه های ذرت.

Table 7. Analysis of variance of morphological parameters in maize seedlings.

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	وزن خشک ساقه‌چه	طول ساقه‌چه	طول برگ	وزن خشک ریشه‌چه	طول ریشه‌چه
		Plumule dry weight	Plumule stem	Leaf length	Radicle dry weight	Radicle length
سالیسیلیک اسید Salicylic acid (A)	1	026523037***	2.535*	13.6504**	0.05529600***	47.6016***
غلظت کادمیم Cd concentration (B)	3	062418049***	12.2877***	93.177***	0.07599972***	74.26222***
اثر متقابل Interaction (A×B)	3	0.00310304 ^{n.s.}	1.6383*	0.451527 ^{n.s.}	0.00073 ^{n.s.}	0.309166 ^{n.s.}
اشتباه آزمایشی Error	16	0.00231775	0.34125	0.6848667	0.00072692	0.3091667
C.V. ضریب تغییرات	-	6.14	11.16	6.25	10.48	3.70

*** و **؛ به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ و n.s. نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار است. *، ** and ***, significant at 0.05, 0.01 and 0.001 probability level respectively, and n.s. no significant.

2011). تجمع بیشتر مالون دی آلدئید در ریشه‌چه نسبت به ساقه‌چه نیز دلیلی بر این ادعاست (جدول ۵ و ۶، شکل ۳-a). کاهش وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه تحت تنش کادمیم در گیاهانی چون *Matthiola chenopodiifolia* (Ghaderian and Jamali Hajiani, 2010)، کاهو (Porakbar and Haghghi et al., 2010)، ذرت (Ashrafi, 2011) و چغندر لبویی (Behtash et al., 2010) نیز گزارش شده است. به دلیل حساسیت ریشه به فلزات سنگین به عنوان اولین اندامی که در معرض سمیت قرار می‌گیرد، از طول ریشه به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مهم مقاومت گیاه نسبت به سمیت فلزات بر گیاهان استفاده شده است (Ghaderian and Jamali Hajiani, 2010). بر این اساس و با توجه به نتایج افزایش غلظت کادمیم باعث کاهش مقاومت ریشه‌چه و بالطبع گیاهچه‌های ذرت در برابر کادمیم می‌گردد.

بررسی اثر ساده غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم بر صفات مورفولوژیک گیاهچه‌های ذرت نیز نشان داد که با افزایش غلظت کلرید کادمیم وزن خشک ساقه‌چه، طول برگ، وزن خشک و طول ریشه‌چه کاهش معنی‌داری داشت (جدول ۹).

در بین صفات مورفولوژیک اندازه‌گیری شده بیشترین تأثیر افزایش غلظت کلرید کادمیم بر روی وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه بود. در این میان، وزن خشک ریشه‌چه نسبت به ساقه‌چه کاهش بیشتری داشت (جدول ۹). علت کاهش بیشتر وزن خشک ریشه‌چه نسبت به ساقه‌چه این است که ریشه‌چه اولین اندامی است که در معرض سمی شدن قرار دارد و بیش از سایر اندام‌ها در معرض آسیب عوامل بیرونی قرار می‌گیرد، به عبارت دیگر ریشه‌چه به طور مستقیم و سایر قسمت‌ها به طور غیرمستقیم در معرض سمیت کادمیم قرار می‌گیرند (Porakbar and Ashrafi, 2011).

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد سالیسیلیک اسید بر صفات مورفولوژیک گیاهچه‌های ذرت.

Table 8. Mean comparison of salicylic acid levels on morphological parameters of maize seedlings.

	Shoot		Radicale		
	وزن خشک Dry weight	طول ساقه‌چه Plumule stem	طول برگ Leaf length	وزن خشک dry weight	طول ریشه‌چه Radicale length
سطوح سالیسیلیک اسید Salicylic acid					
کاربرد سالیسیلیک اسید SA application	0.889 ^a	5.56 ^a	13.98 ^a	0.305 ^a	16.41 ^a
عدم کاربرد سالیسیلیک اسید SA non-application	0.679 ^b	4.91 ^b	12.48 ^b	0.209 ^b	13.59 ^b

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵٪ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.
Means with at least one similar letter, are not significant different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's test.

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف کلرید کادمیم بر صفات مورفولوژیک گیاهچه‌های ذرت.

Table 9. Mean comparison of Cadmium levels on morphological parameters of maize seedlings.

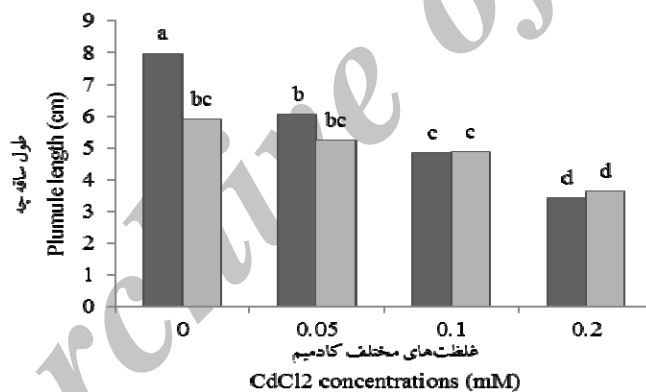
	Shoot		Radicale		
	وزن خشک Dry weight	طول ساقه‌چه Plumule stem	طول برگ Leaf length	وزن خشک dry weight	طول ریشه‌چه Radicale length
سطوح کادمیم Cd Levels (mM)					
0	1.153 ^a	6.93 ^a	17.83 ^a	0.4 ^a	19.43 ^a
0.05	0.932 ^b	5.63 ^b	14.55 ^b	0.283 ^b	15.93 ^b
0.1	0.625 ^c	4.85 ^c	12.03 ^c	0.206 ^c	13.36 ^c
0.2	0.425 ^d	3.51 ^d	8.51 ^d	0.138 ^d	11.26 ^d

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵٪ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.
Means with at least one similar letter, are not significant different ($p \leq 0.05$) based on Duncan's test.

نتیجه گیری

در این آزمایش مشاهده شد که افزایش غلظت کلرید کادمیم از طریق کاهش صفات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی باعث کاهش رشد گیاهچه‌های ذرت می‌گردد. در اثر سمیت کادمیم گیاه از طریق تولید ترکیباتی مانند ترکیبات فنلی باعث پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد شده و تا حدی اثرات ناشی از تنش را تعدیل می‌نماید. استفاده از موادی مانند سالیسیلیک اسید به صورت پیش تیمار بذر افزایش ترکیبات فنلی و پرولین را در غلظت‌های مختلف کادمیم به دنبال دارد. این ترکیبات به نوعی کاهنده میزان سمیت گیاهچه‌های ذرت هستند و به طبع آن افزایش خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه را به دنبال دارند و می‌توان گفت که بقای گیاهچه‌های تحت سمیت کادمیم را تا حدودی تضمین می‌نمایند. اما نکته قابل بررسی این است که آیا افزایش بقای گیاهچه‌ها در غلظت‌های کادمیم باعث جذب بیشتر این ماده می‌گردد یا خیر.

بیشترین طول ساقه‌چه در غلظت‌های صفر (شاهد) و ۰/۰۵ میلی مولار کلرید کادمیم مربوط به گیاهچه‌هایی بود که تحت تیمار سالیسیلیک اسید قرار داشتند (شکل ۴). با توجه به نتایج بدست آمده سالیسیلیک اسید در غلظت پایین (۰/۰۵ میلی مولار) کلرید کادمیم تأثیر مثبتی بر طول ساقه گیاهچه‌های ذرت داشت. به طوری که در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۲ میلی مولار کلرید کادمیم از لحاظ طول ساقه‌چه تفاوت معنی‌داری میان کاربرد و عدم کاربرد سالیسیلیک اسید مشاهده نشد (شکل ۴). به نظر می‌رسد به دلیل شدت تخریب کلرید کادمیم در غلظت بالا از اثر سالیسیلیک اسید کاسته شده است. به طور کلی افزایش غلظت کادمیم باعث کاهش طول ساقه‌چه شد. کاهش طول ساقه‌چه تحت تنش کادمیم در جو (Munzuroglu and Zengin, 2006) و تحت تنش کلرید مس در کلزا (Ghorbanli *et al.*, 2007) گزارش شده است.



شکل ۴. تأثیر کاربرد (ستون‌های تیره) و عدم کاربرد (ستون‌های روشن) سالیسیلیک اسید بر طول ساقه‌چه ذرت در غلظت‌های مختلف کادمیم کلرید. میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد فاقد تفاوت معنی دار هستند.

Fig. 4. Effect of application (Black bars) and no application (Gray bars) of salicylic acid on plumule length of Maize in different CdCl₂ concentrations. Means with same letters are not significantly different at $\alpha = 0.05$ based on Duncan's test.

منابع

- Alloway, B.J., 1999. Heavy Metals in Soils. 1st ed., Blackie Academic and Professional Glasgow.
- Alvarez, M.E., 2000. Salicylic acid in machinery hypersensitive cell death and disease resistance. Plant Mol. Biol. 44, 429-442.

- Arabi, Z., Homaei, M., Asadi, M.E., 2011. Comparison effects of Citric Acid and synthetic chelators in enhancing phytoremediation of cadmium. *J. Sci. Technol. Agric. Nat. Resour.* 14(54), 85-95. [In Persian with English Summary].
- Arberg, B., 1981. Plant growth regulators. Monosubstituted benzoic acid. *Swed. Agric. Res.*, 11 (1981): 93-105.
- Azooz, M.M., 2009. Salt stress mitigation by seed priming with salicylic acid in two faba bean genotypes differing in salt tolerance. *Int. J. Agric. Biol.* 11(4), 343-350.
- Bates, L.S., Waldern, R.P., Tear, I.D., 1973. Rapid determination of proline for water stress studies. *Plant Soil.* 39, 250-257.
- Balestrasse, K.B., Gallego, S.M., Benavides, M.P., Tomaro, M.L., 2005. Polyamines and proline are affected by cadmium stress in nodules and roots of soybean plants. *Plant Soil.* 270, 343-353.
- Bayat, H., Mardani, H., Arouie, H., Salahvarzi, Y., 2011. Effects of salicylic acid on morphological and physiological characteristics of cucumber seedling (*Cucumis sativus* cv. Super Dominus) under drought stress. *J. Plant Prod.* 18(3), 63-76. [In Persian with English Summary].
- Behtash, F., Tabatabaee, J., Malakouti, M.J., Sorouroaldin, M.H., Oustan, S., 2010. Effect of Zinc and Cadmium on growth, chlorophyll content, photosynthesis and cadmium concentration in sugar beet. *Iranian J. Soil Res.* 24(1), 31-41. [In Persian with English Summary].
- Borsani, O., Valpuseta, V., Botella, M.A., 2001. Evidence for a role of salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in *Arabidopsis* seedlings. *J. Plant Physiol.* 126, 1024-1030.
- Chen, Z., Iyer, S., Caplan, A., Klessig, D.F., Fan, B., 1997. Differential accumulation of salicylic acid and salicylic acid-sensitive catalase in different rice tissue. *J. Plant Physiol.* 114, 193-201.
- Drazkiewicz, M., Tukendorf, A., Baszynski, T., 2003. Age-dependent response of maize leaf segments to cadmium treatment: effect on chlorophyll fluorescence and phytochelatin accumulation. *J. Plant Physiol.* 160, 247-254.
- Dong, J., Wan, G., Liang, Z., 2010. Accumulation of salicylic acid-induced phenolic compounds and raised activities of secondary metabolic and antioxidative enzyme in *Salvia miltiorrhiza* cell culture. *J. Biotechnol.* 148(2-3), 99-104.
- Doulatabadian, A., Modarres sanavy S.A.M., Etemadi, F., 2008. Effect of pretreatment of salicylic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination under salt stress. *Iranian J. Biology.* 21(4), 692-702. [In Persian with English Summary].
- Durner, J., Shaha, J., Klessing, D.F., 1997. Salicylic acid and disease resistance in plants. *Trends Plant Sci.* 2, 266-274.
- El-Tayeb, M. A., 2005. Response of barley grain to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *J. Plant Growth Regul.* 45, 215-225.
- Gao, W.J., 2000. The experimental technology of plant physiology. World Book Press. Xian. 89-258.
- Ghaderian, S.M., Jamali Hajiani, N., 2010. Tolerance, uptake and accumulation of cadmium in *Matthiola chenopodiifolia* Fisch & C.A. Mey (Brassicaceae). *J. Plant Biol.* 6, 87-97. [In Persian with English Summary].

- Ghorbanli, M., Meighani, F., Asadollahy, B., 2007. Effect of copper chloride stress on chlorophyll, carbohydrate accumulation, and some growth parameters in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars. Pajouhesh & Sazandegi. 76, 134-141. [In Persian with English Summary].
- Greger, M., Ogren, E., 1991. Direct and indirect effects of Cd²⁺ on photosynthesis in sugar beet (*Beta vulgaris*). J. Plant Physiol. 83, 129-135.
- Haghighi, M., Kafi, M., Taghavi, T.S., Kashi, A.K., Savabeghi, G.H.R., 2010. Effect of humic acid on N, P and stress indicators of Lettuce polluted by cadmium. J. Water Soil Sci. 1(20), 87-98. [In Persian with English Summary].
- Horvath, E., Szalai, G., Janda, T., 2007. Introduction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. J. Plant Growth Regul. 26, 290-300.
- Kang, H.M., Saltveit, M., 2002. Chilling tolerance in maize, cucumber and rice seedling leaves and roots are differentially affected by salicylic acid. J. Plant Physiol. 115, 571-576.
- Kalantari, K.H., Oloumi, H., 2005. Study the effects of CdCl₂ on lipid peroxidation and antioxidant compounds content in *Brassica napus*. Iranian J. Sci. & Tech. 29(A1), 201-208.
- Keshavarz, H., Modarres sani, A.M., Zarin Kamar, F., Dolat abadiyan, A., Panahi, M., Sadat Asilan, K., 2012. Study of foliar application of salicylic acid on some biochemical properties of two canola cultivars (*Brassica napus* L.) under cold stress condition. Iranian J. Field Crop Sci. 42(4), 723-734. [In Persian with English Summary].
- Khavarinejad, R.A., Mehrabian, S., Asadi, A., 2004. The effect of salicylic acid on the concentration of anthocyanins in infected daisy (*Bellis Perennis* L.) plants infected by some of the bacterial lines. J. Sci. (AL-ZAHRA University). 17(1), 20-33.
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol. 148, 350-382.
- Mcgrath, S.P., Zhao, F., 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. Curr. Opin. Biotech. 14, 277-282.
- Mclaughlin, M.J., Singh, B.R., 1999. Cadmium in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers Dordrecht.
- Mehrabiyan moghaddam, N., Arvin, M.J., Khajoe nejad, G., Maghsoudi, K., 2011. Effect of salicylic acid on growth and forage and grain yield of maize under drought stress in field conditions. J. Seed Plant Prod. 27-2(1), 41-55. [In Persian with English Summary].
- Michalak, A., 2006. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. Polish J. Environ. Stud. 15(4), 523-530.
- Mishra, A., Choudhuri, M.A., 1999. Effect of salicylic acid on heavy metal-induced membranedeterioration mediated lipoxygenase in rice. Biol. Plant 42, 409-415.
- Mohammadi, M., Fahimi, H., Majd, A., 2009. The comparative of salicylic acid and Gibberellin on seed germination of the lentil (*Lens culinaris* L.). J. Biol. Islamic Azad University Garmsar Branch. 4(4), 33-44. [In Persian with English Summary].
- Munzuroglu, O., Zengin, F.K., 2006. Effect of cadmium on germination, coleoptile and root growth of barley seeds in the presence of gibberellic acid and kinetin. J. Environ. Biol. 27(4), 671-677.

- Nascimento, C.W.A., Xing, B., 2006. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Sci. Agric.* 63(3), 299-311.
- Osareh, M.H., Shariat, A., 2009. Salinity resistance in germination stage and growth stage in some *Eucalyptus* species. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 15(6), 145-157. [In Persian with English Summary].
- Porakbar, L., Ashrafi, R., 2011. Effect of cadmium on H₂O₂ produce and some of anti-oxidant enzymes action in maize (*Zea mays* L.). *Quarterly J. Sci.* (Tarbiat Moallem University). 9(3), 473-484. [In Persian with English Summary].
- Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gomes, M., Romero-Puertas, M.C., Del Rio R.A., 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of Pea plant. *J. Exp. Bot.* 52, 2115-2126.
- Sekara, A., Poniedzialek, M., Ciura, J., Jedrszczyk, E., 2005. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implications for phytoremediation. *Polish J. Enviro. Stud.* 14(4), 509-516.
- Senaranta, T., Teuchell, D., Bumm, E., Dixon, K., 2002. Acetyl salicylic acid (aspirin) and salicylic acid induce multiple stress tolerance in bean and tomato plants. *Plant Growth Regul.* 30, 157-161.
- Singh, Y., Malik, C.P., 2011. Phenols and their antioxidant activity in *Brassica juncea* seedlings growing under HgCl₂ stress. *J. Microbiol. Biotech. Res.* 1(4), 124-130.
- Sivaci, A., Elmas, E., 2012. The combined effects of cadmium and salinity on some pigments and total phenolic compounds of *Myriophyllum heterophyllum* Michx. and *Potamogeton crispus* L. *Afr. J. Agric. Res.* 7(26), 3813-3818.
- Sharma, S.S., Diets, K.J., 2006. The significance amini acids and amino acid-derived molecules in plant response and adaptation to heavy metal stress. *J. Exp. Bot.* 57, 711-726.
- Sharma, Y.K., Leon, J., Raskin, I., Davis, K.R., 1996. Ozone-induced responses in *Arabidopsis thaliana* the role of salicylic acid in the accumulation of defence-related transcripts and induced resistance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 93, 5099-5104.
- Shi, G.R., Cai, Q.S., Liu, Q.Q., Wu, L., 2009. Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in hemp plants in relation to cadmium uptake, photosynthesis, and antioxidant enzymes. *Acta Physiol. Plant.* 31, 969-977.
- Tasgin, E., Atici, O., Nalbantogly, B., 2003. Effects of salicylic acid and cold on freezing tolerance in winter wheat leaves. *Plant Growth Regul.* 41, 231-236.
- Tatar, O., Gevrek, M.N., 2008. Influence of water stress on proline accumulation, lipid peroxidation and water content of wheat. *Asian J. Plant Sci.* 1-4.
- Tong, Y., Kneer, R., Zhu, Y., 2004. Vacuolar compartmentalization: a second-generation approach to engineering plants for phytoremediation. *Trends Plant Sci.* 9(1), 7-9.
- Wanger, G.J., 1976. Content and vacuole/extra vacuole distribution of natural sugars, free amino acids and anthocyanins in protoplasts. *Plant Physiol.* 64, 88-93.
- Zengin, F.K., Munzuroglu, O., 2005. Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. *Acta Biol. Cracoviensia Series Botanica.* 47(2), 157-164.