

تأثیر متقابل سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی و تجمع برخی عناصر در بخش هوایی گیاهچه‌های سویا

ریحانه عموآقایی*، الهام معرفت و لایلا شبانی
گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

در این پژوهش، نقش سالیسیلیک‌اسید در تغییرات فیزیولوژیک القا شده توسط کادمیوم در گیاهچه‌های سویا در محیط کشت هیدروپونیک با بستر جامد در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. پس از پیش تیمار بذرها با سالیسیلیک‌اسید ۰/۵ میلی‌مولار به مدت ۶ ساعت، بذرها به گلدان‌های حاوی پرلیت منتقل و با محلول غذایی هوگلند حاوی ۲۰۰ میکرومولار کلرید کادمیوم به مدت ۲۰ روز آبیاری شدند. پس از برداشت گیاهچه‌ها و اندازه‌گیری شاخص‌های رشد (وزن تر و خشک و طول ریشه و اندام هوایی)، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها)، درصد نشت الکترولیتی در برگ، میزان عناصر کادمیوم (در ریشه و بخش هوایی) و پتاسیم و کلسیم (در بخش هوایی) مشخص شد که سالیسیلیک‌اسید تأثیر اندکی بر این شاخص‌ها در غیاب کادمیوم داشته، در حالی که در حضور کادمیوم سالیسیلیک‌اسید شاخص‌های رشد، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان عناصر پتاسیم و کلسیم (در بخش هوایی) افزایش و در مقابل، درصد نشت الکترولیتی در برگ‌ها و میزان عنصر کادمیوم در بخش هوایی گیاه کاهش داشته است. بنابراین، سالیسیلیک‌اسید با تغییر استراتژی گیاه در انتقال عناصر به بخش هوایی و جلوگیری از نشت الکترولیتی و در نتیجه حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ‌ها توانسته است سمیت کادمیوم را کاهش داده، پتانسیل رشد گیاه را حفظ نماید.

واژه‌های کلیدی: سالیسیلیک‌اسید، رشد، سویا، کادمیوم، نشت الکترولیتی

مقدمه

و مواد معدنی نظیر کلسیم است و میزان چربی اشباع شده آن نیز پایین است. روغن سویا از مهم‌ترین روغن‌های نباتی خوراکی است. همچنین، بذر سویا

سویا سرشار از مواد مغذی و حاوی پروتئین‌های گیاهی، اولیگو ساکاریدها، فیبر خوراکی، ایزوفلاوون‌ها

غیرضروری مانند کادمیوم، جیوه، سرب، سلنیوم و آرسنیک هستند (Callahan *et al.*, 2005; Babula *et al.*, 2008). کادمیوم یکی از فلزات سنگین غیرضروری و آلاینده محیط زیست است و به علت تحرک بالا و غلظت کم به راحتی از خاک وارد زنجیره غذایی می‌شود. بنابراین، یکی از خطرناک‌ترین فلزات سنگین در گیاهان محسوب می‌شود (Choudhury and Panda, 2004).

سالیسیلیک‌اسید (۲- هیدروکسی بنزوئیک‌اسید)، از ترکیبات فنلی و یکی از هورمون‌های گیاهی است که در همه اندام‌های گیاهی وجود دارد و هنگامی که سلول، اندام‌ها یا کل گیاه با تنش‌های زیستی و غیرزیستی مواجه می‌شوند، غلظت این هورمون افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان سالیسیلیک‌اسید را به عنوان مولکول پیام‌رسان داخلی در نظر گرفت که در پاسخ‌های اختصاصی به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش دارد (El-Tayeb *et al.*, 2006; Krantev *et al.*, 2008). سالیسیلیک‌اسید در تنظیم فرآیندهای متفاوت شامل رشد و نمو گیاه، جوانه‌زنی بذر، جذب و انتقال یون، توزیع عناصر، سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، تنفس، گلیکولیز، گل‌دهی و تولید گرما در گیاهان گرمازا (thermogenic) نقش مهمی ایفا می‌کند (Shi and Zhu, 2008; Murtaza *et al.*, 2010).

سالیسیلیک‌اسید باعث کنترل بیان ژن و سنتز پروتئین‌های تحمل به تنش‌ها می‌شود. مشخص شده است که پس از پیام‌رسانی سالیسیلیک‌اسید میزان مولکول‌های پروتئین فسفاتاز، MAP کینازها، عوامل رونویسی bZIP و پروتئین‌های دارای واحدهای تکراری آنکیرین (ankirine) افزایش می‌یابد (Klessig

دارای مقدار زیادی ذرات نشاسته است که این ذرات نشاسته مخلوطی از آمیلوز و آمیلوپکتین هستند (مجنون حسینی، ۱۳۷۵).

از نظر سطح اراضی زراعی زیر کشت در دنیا، در بین حبوبات، سویا در مقام اول (بیش از ۵۲ میلیون هکتار) قرار دارد (لطیفی، ۱۳۷۲). همچنین، طبق گزارش اداره کل آمار و اطلاعات وزارت کشاورزی در سال زراعی ۱۳۸۵ سطح زیر کشت سویا در ایران حدود ۷۴۴۶۱۰ هکتار و در سال زراعی ۱۳۸۸ بیش از ۸۲۰ هزار هکتار بوده است.

به علت افزایش مصرف سویا در غذاهای صنعتی به ویژه در کشورهای توسعه یافته و مصرف شیر سویا به جای شیر مادر در تغذیه نوزادان و همچنین، به خاطر اهمیت آن در تغذیه دام، به کشت این گیاه در تیره حبوبات بیشتر توجه شده است. امروزه در بسیاری از مناطق صنعتی آلوده به برخی فلزات سنگین نیز کشت می‌شود (مجنون حسینی، ۱۳۷۵).

فلزات سنگین خطرناک‌ترین آلاینده‌ها هستند که در پوسته زمین و رسوبات وجود دارند. برخی فلزات سنگین مانند روی، نیکل و مس چون بخشی از ترکیبات مهم رنگیزه‌ها و آنزیم‌ها را تشکیل می‌دهند، جزو عناصر ضروری محسوب می‌شوند و فقط در غلظت‌های بالاتر از نیاز فیزیولوژیک گیاهان آثار سمی دارند. ولی برخی دیگر از فلزات سنگین مانند قلع و سرب که جزو فلزات غیر ضروری محسوب می‌شوند، حتی در غلظت‌های پایین نیز آثار سمی روی گیاهان دارند و به همین علت، فلزات سنگین به عنوان عوامل تنش‌زا برای گیاهان محسوب می‌شوند. گیاهان قادر به مهار غلظت فلزات سنگین ضروری و همچنین،

حال، حفاظت گیاهان در برابر تنش اکسیداتیو توسط سالیسیلیک اسید با افزایش در آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مرتبط است و فعالیت این آنزیم‌ها سطح نهایی رادیکال‌های آزاد و پراکسید هیدروژن در گیاه را کاهش می‌دهد (Guo *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2008).

با وجود این که پژوهش‌های متعددی در زمینه آثار سمی فلزات سنگین بر رشد و متابولیسم گیاهان مختلف انجام شده است، اما اطلاعات اندکی درباره راهکارهای کاهش آسیب‌های ناشی از سمیت فلزات سنگین در گیاهان وجود دارد. در این پژوهش، نقش سالیسیلیک اسید در برابر تنش ناشی از کادمیوم در گیاهچه‌های سویا بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

پس از ضد عفونی کردن بذرهای سویا (رقم هیبرید Williams×Colombus) با هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد به مدت ۵ دقیقه و چندین بار شستشو با آب مقطر، نیمی از بذرهای در محلول ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید و نیمی دیگر در آب مقطر به مدت ۶ ساعت خیسانده شدند (Metwally *et al.*, 2003). سپس بذرهای به گلدان‌های پلاستیکی حاوی پرلیت منتقل و این گلدان‌ها در اتاقک رشد (مدل GC-1000) در دوره نوری ۱۳ ساعت روشنایی (دمای ۲۸ درجه سانتیگراد) و ۱۱ ساعت تاریکی (دمای ۱۸ درجه سانتیگراد) و در شدت نور ۷۰۰۰ لوکس و رطوبت ۵۰ درصد قرار داده شدند. نخست، گلدان‌ها با آب مقطر به مدت ۳-۴ روز و سپس نیمی از گلدان‌ها با محلول غذایی هوگلند (تمام قدرت) حاوی ۲۰۰ میکرومولار

(*et al.*, 2000; Metwally *et al.*, 2003) فلزات سنگین و مولکول‌های پیام‌رسان مانند جاسمونات، سالیسیلیک اسید، اتیلن و آبسزیک اسید باعث بیان ژن‌ها و سنتز پروتئین‌های تحمل به تنش مانند PvSR2 می‌شوند. همچنین، فلزات سنگین باعث بیان ژن‌های مخصوص تنش‌های دیگر می‌شوند (He *et al.*, 2002; Eckardt, 2003).

سالیسیلیک اسید همچنین باعث تنظیم رادیکال‌های آزاد اکسیژن و آنتی‌اکسیدان‌ها می‌شود. سالیسیلیک اسید به عنوان مولکول پیام‌رسان داخلی با مسیر پیام‌رسانی رادیکال‌های آزاد اکسیژن بر هم کنش دارد. به عنوان نمونه، تیمار با سالیسیلیک اسید خارجی باعث تجمع پراکسید هیدروژن در آراییدوپسیس، تنباکو و خردل می‌شود (Rao *et al.*, 1997; Zawoznik *et al.*, 2007). لازم به یادآوری است که اگر چه مقادیر بالای رادیکال‌های آزاد مخرب بوده، باعث آسیب‌های سلولی و حتی مرگ گیاه می‌شود، باوجود این، مقادیر کم رادیکال‌های اکسیژنی به ویژه پراکسید هیدروژن نقش سیگنالی داشته، مسیرهای دفاعی خاصی مانند سنتز برخی هورمون‌ها نظیر جاسمونات، سالیسیلیک اسید، آبسزیک اسید و اتیلن و یا سنتز یا فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را فعال می‌کند. سالیسیلیک اسید نیز در القای پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی نقش دارد. نشان داده شده که کاربرد سالیسیلیک اسید خارجی و پراکسید هیدروژن باعث القای تحمل بالاتر گیاهان سیب‌زمینی به دمای بالا می‌شوند. این نتایج نشان می‌دهد که سالیسیلیک اسید ممکن است دارای مسیرهای پیام‌رسانی مشترک با واسطه تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسیژن باشد. به هر

۸۰ درصد استخراج شدند. پس از صاف کردن عصاره حاصل با کاغذ صافی، جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با اسپکتروفتومتر (مدل 6300 JENWAY) خوانده و مطابق با رابطه‌های زیر میزان رنگیزه‌های یاد شده بر حسب میلی‌گرم در هر گرم وزن تر بافت گیاهی محاسبه شد:

$$a \text{ کلروفیل} = \frac{[(12.7 \times D663) - (2.69 \times D645)] \times V}{1000 \times W}$$

$$\text{کلروفیل کل} = \frac{[(20.2 \times D645) + (8.02 \times D663)] \times V}{1000 \times W}$$

$$b \text{ کلروفیل} = \frac{[(22.9 \times D645) + (4.93 \times D663)] \times V}{1000 \times W}$$

$$\text{کارتنوئیدها} = \frac{(100 \times D470 - 1.82 \times \text{Chl.a} - 85.02 \times \text{Chl.b})}{198}$$

اندازه‌گیری درصد نشت الکترولیتی غشا در برگ

برای سنجش این شاخص، ۰/۱ گرم از بافت تر برگ از هر تکرار به دقت شسته و در لوله آزمایش درپوش دار حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه قرار داده شد. این لوله‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد در حمام آب گرم قرار گرفتند. پس از ۳ ساعت، هدایت الکتریکی آنها با استفاده از EC متر اندازه‌گیری شد. سپس لوله‌های حاوی نمونه‌های برگ به مدت ۲ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند و مجدداً EC آنها پس از سرد شدن اندازه‌گیری شد. درصد هدایت الکتریکی بیانگر میزان نشت الکتریکی مواد از غشاست که مطابق رابطه ۱ قابل محاسبه است. EC_1 و EC_2 ، هدایت الکتریکی محلول‌ها به ترتیب پیش و پس از جوشیدن است (Dionsio-Sese and Tobita, 1998).

$$EC\% = (EC_1/EC_2) \times 100$$

رابطه ۱

کلرید کادمیوم و نیمی دیگر تنها با محلول غذایی هوگلند (تقریباً ۱۰۰ میلی‌لیتر برای هر گلدان) هر ۲ روز یک بار آبیاری و پس از ۳ هفته گیاهچه‌ها برداشت شدند. تحقیقات اولیه نشان داد که سویا نسبتاً مقاوم به کادمیوم بوده، سطوح کمتر از ۱۰۰ میلی‌مولار کادمیوم را تحمل می‌کند. در حالی که غلظت‌های بالاتر تأثیر منفی مهمی را در رشد و نمو این گیاه دارد.

اندازه‌گیری وزن تر، خشک و طول ریشه و اندام هوایی

برای اندازه‌گیری وزن تر ریشه و اندام هوایی، ابتدا ریشه و ساقه گیاهچه‌های برداشت شده جدا و سپس با ترازو وزن آنها جداگانه بر حسب گرم اندازه‌گیری شد (پیش از اندازه‌گیری وزن تر، ریشه در صورت مرطوب بودن با کاغذ صافی خشک شد). پس از اندازه‌گیری وزن تر ریشه و ساقه، ریشه‌ها و ساقه‌های گیاهچه‌های مربوط به هر گلدان را داخل پاکت‌های کاغذی مخصوص گذاشته و برای خشک شدن در آون (مدل SHIMAZCO) به مدت ۴۸ ساعت و در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. سپس پاکت‌ها از آون خارج و وزن خشک ریشه‌ها و ساقه‌های داخل هر پاکت جداگانه با ترازو بر حسب گرم اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری طول ریشه و اندام هوایی، پس از برداشت گیاهچه‌ها ریشه و ساقه آنها جدا شده و طول هر یک از آنها توسط خط کش بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کارتنوئیدها

محاسبه میزان کلروفیل و کارتنوئیدها در برگ‌های سویا به ترتیب با استفاده از روش Arnon (۱۹۴۹) و Lichtenthaler (۱۹۸۷) انجام شد. مطابق با این روش، ۰/۱ گرم از بافت تر برگ وزن شد و رنگیزه‌ها با استون

درصد، وزن خشک ریشه و بخش هوایی را به ترتیب ۳۱/۹ و ۴۵/۲ درصد و نیز طول ریشه و اندام هوایی را به ترتیب ۴۴/۳ و ۵۱ درصد در مقایسه با گیاهان شاهد کاهش داد (جدول ۱). سالیسیلیک اسید در گیاهان شاهد تأثیر معنی داری بر شاخص‌های رشد نداشت (به جز در مورد وزن خشک بخش هوایی که به میزان ۹/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش یافته است)، در حالی که در گیاهان تیمار شده با کادمیوم باعث افزایش همه شاخص‌های رشد و در نتیجه کاهش سمیت کادمیوم شد، به طوری که باعث افزایش وزن تر ریشه و بخش هوایی به میزان ۳۹/۵ و ۳۱/۵ درصد، وزن خشک ریشه و بخش هوایی به میزان ۱۹/۸ و ۳۰/۱ درصد و طول ریشه و اندام هوایی به میزان ۳۰/۴ و ۲۹/۸ درصد در مقایسه با گیاهان تیمار شده با کادمیوم شد (جدول ۱).

تأثیر سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر مقادیر کلروفیل a، b، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a/b و کاروتنوئیدها در برگ

در بررسی اثر متقابل سالیسیلیک اسید و کادمیوم (جدول ۲)، کادمیوم در گیاهان شاهد، مقادیر کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها را به ترتیب به میزان ۳۷، ۵۸/۹، ۵۱/۶ و ۴۱/۳ درصد کاهش، در حالی که نسبت کلروفیل a/b را به میزان ۳۵/۱ درصد افزایش داده است. سالیسیلیک اسید در گیاهان شاهد تأثیر معنی داری بر میزان کلروفیل b، کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b نداشت، با وجود این، کلروفیل a و کاروتنوئیدها را به میزان ۵/۳ و ۱۱/۶ درصد کاهش داد (جدول ۲). سالیسیلیک اسید در گیاهان تیمار شده با کادمیوم سبب افزایش کلروفیل‌های a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها به میزان ۲۷/۹، ۳۵/۶، ۲۴/۸ و ۲۹/۵ درصد و کاهش در نسبت کلروفیل a/b به میزان ۱۰/۸ درصد شد.

اندازه‌گیری میزان عناصر کلسیم و پتاسیم (در بخش هوایی) و کادمیوم (در ریشه و بخش هوایی)

برای اندازه‌گیری مقدار عناصر در گیاهان از روش Reeves و همکاران (۱۹۹۹) استفاده شد. مطابق با این روش ریشه و بخش‌های هوایی نمونه‌های گیاهی جمع‌آوری شده جدا و ۳ بار با آب مقطر شستشو داده شد. نمونه‌ها در داخل پاکت‌های ویژه قرار گرفت و سپس در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شد. سپس حدود یک گرم از ریشه و بخش‌های هوایی هر نمونه وزن و به مدت ۱۴ ساعت در کوره الکتريکی و در دمای ۴۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. خاکستر حاصل پس از سرد شدن در ۱۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید ۱۰ درصد حل شد. پس از صاف کردن، محلول‌ها درون لوله‌های پلاستیکی ویژه ریخته شد و مقدار عناصر یاد شده توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی تحلیل شد.

تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش، در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۶ و MSTATC انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج

تأثیر سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر شاخص‌های رشد ریشه و اندام هوایی

اثر متقابل سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر شاخص‌های رشد (وزن تر، خشک و طول ریشه و اندام هوایی) در جدول ۱ نشان داده شده است. کادمیوم وزن تر ریشه و بخش هوایی را به ترتیب ۴۹/۳ و ۴۱/۲

جدول ۱- اثر متقابل سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر شاخص‌های رشد (وزن تر، خشک و طول ریشه و بخش هوایی) در گیاهچه‌های ۲۰ روزه سویا. مقادیر میانگین ۳ تکرار \pm انحراف معیار را نشان می‌دهند. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهاست.

| تیمار | وزن تر (گرم) | | وزن خشک (گرم) | | طول اندام (سانتی‌متر) | |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | ریشه | بخش هوایی | ریشه | بخش هوایی | ریشه | بخش هوایی |
| شاهد | ۰/۶۸ \pm ۰/۰۱ ^a | ۴/۱۰ \pm ۰/۱۳ ^a | ۰/۱۶ \pm ۰/۰۰۴ ^a | ۰/۹۶ \pm ۰/۰۱ ^b | ۱۵/۸۳ \pm ۰/۲۵ ^a | ۱۰/۳ \pm ۰/۱۵ ^a |
| کادمیوم | ۰/۳۴ \pm ۰/۰۱ ^c | ۲/۴۱ \pm ۰/۰۶ ^c | ۰/۱۱ \pm ۰/۰۰۸ ^c | ۰/۵۲ \pm ۰/۰۰۴ ^d | ۸/۸۰ \pm ۰/۰۲ ^c | ۵/۰۴ \pm ۰/۰۷ ^c |
| سالیسیلیک‌اسید | ۰/۶۶ \pm ۰/۰۱ ^a | ۳/۸۸ \pm ۰/۲۶ ^a | ۰/۱۷ \pm ۰/۰۰۲ ^a | ۱/۰۶ \pm ۰/۰۰۷ ^a | ۱۶/۱۳ \pm ۰/۲۵ ^a | ۱۰/۱۱ \pm ۰/۱۵ ^a |
| کادمیوم+سالیسیلیک‌اسید | ۰/۵۷ \pm ۰/۰۱ ^b | ۳/۵۲ \pm ۰/۰۷ ^b | ۰/۱۴ \pm ۰/۰۰۳ ^b | ۰/۷۵ \pm ۰/۰۰۵ ^c | ۱۲/۶۶ \pm ۰/۳۹ ^b | ۷/۱۹ \pm ۰/۱۷ ^b |

جدول ۲- اثر متقابل سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a/b و کاروتنوئیدها در گیاهچه‌های ۲۰ روزه سویا. مقادیر میانگین ۳ تکرار \pm انحراف معیار را نشان می‌دهند. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهاست.

| تیمار | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | کاروتنوئیدها | نسبت کلروفیل a/b |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | (میلی‌گرم/گرم وزن تر) | | | | |
| شاهد | ۷/۴۶ \pm ۰/۱۵ ^a | ۵/۶۶ \pm ۰/۱۵ ^a | ۱۳/۷ \pm ۰/۲۰ ^a | ۴/۳ \pm ۰/۲۰ ^a | ۱/۳۱ \pm ۰/۰۴ ^c |
| کادمیوم | ۴/۷ \pm ۰/۲ ^d | ۲/۳۲ \pm ۰/۱۲ ^c | ۶/۲۶ \pm ۰/۴۵ ^c | ۲/۵۲ \pm ۰/۱۰ ^c | ۲/۰۳ \pm ۰/۱۷ ^a |
| سالیسیلیک‌اسید | ۷/۰۶ \pm ۰/۱۵ ^b | ۵/۷۶ \pm ۰/۳۵ ^a | ۱۳/۴۶ \pm ۰/۳۰ ^a | ۳/۸ \pm ۰/۳۰ ^b | ۱/۲۲ \pm ۰/۰۴ ^c |
| کادمیوم+سالیسیلیک‌اسید | ۶/۵۲ \pm ۰/۱۰ ^c | ۳/۶۰ \pm ۰/۱۲ ^b | ۸/۸۱ \pm ۰/۱۷ ^b | ۳/۵۷ \pm ۰/۱۳ ^b | ۱/۸۱ \pm ۰/۰۷ ^b |

در بخش هوایی (به ترتیب ۲۷ و ۲۸ درصد) در مقایسه با گیاهان شاهد شد. تیمار گیاه با سالیسیلیک‌اسید نیز باعث افزایش میزان پتاسیم در بخش هوایی به میزان ۲ درصد نسبت به گیاهان شاهد شد، در حالی که افزایش معنی‌داری در میزان کلسیم در این گیاهان نداشته است. همچنین، سالیسیلیک‌اسید در گیاهان تیمار شده با کادمیوم باعث افزایش میزان عناصر پتاسیم و کلسیم در بخش هوایی به ترتیب به میزان ۱۲ و ۱۰ درصد شد.

تأثیر سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر میزان عنصر کادمیوم در ریشه و بخش هوایی

مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۳) نشان داد که کادمیوم باعث افزایش غلظت کادمیوم ریشه و بخش هوایی به میزان درخور توجهی (۹۹ درصد) در گیاهان شاهد شد که میزان کادمیوم در ریشه ۲/۶ برابر بیشتر از

تأثیر سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر درصد نشت الکترولیتی در برگ

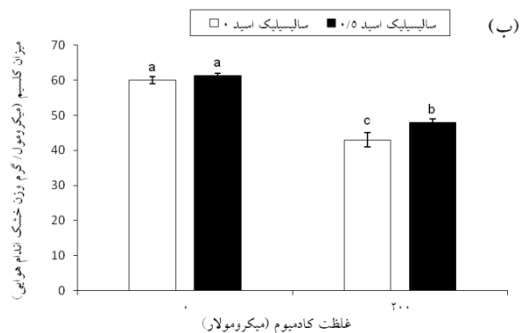
در بررسی اثر متقابل سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم (شکل ۱) مشاهده شد که کادمیوم در گیاهان شاهد، درصد نشت الکترولیتی را به میزان ۵۸/۱ درصد افزایش داد. همچنین، سالیسیلیک‌اسید در گیاهان شاهد تأثیر معنی‌داری بر درصد نشت الکترولیتی نداشت (تقریباً مشابه بود)، در حالی که در گیاهان تیمار شده با کادمیوم باعث کاهش درصد نشت الکترولیتی (۲۹/۷ درصد) و در نتیجه کاهش سمیت کادمیوم شد (شکل ۱).

تأثیر سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر میزان عناصر پتاسیم و کلسیم در بخش هوایی

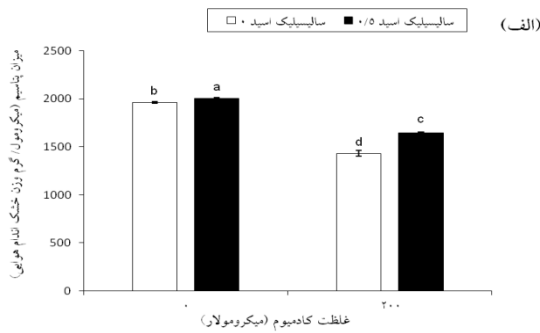
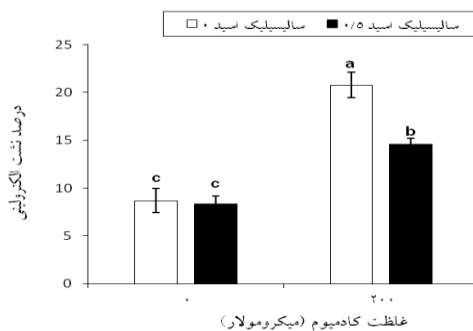
در بررسی اثر متقابل سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم (شکل ۲)، کادمیوم باعث کاهش میزان عناصر پتاسیم و کلسیم

حالی که تأثیر معنی داری بر میزان کادمیوم ریشه و در نتیجه کاهش سمیت آن نداشت (شکل ۳). میزان کادمیوم در ریشه گیاهان تیمار شده با سالیسیلیک اسید و کادمیوم تقریباً ۳ برابر بیشتر از بخش هوایی بود.

شکل ۱- اثر متقابل سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر درصد نشت الکترولیتی در برگ گیاهچه‌های ۲۰ روزه سویا. مقادیر میانگین \pm انحراف معیار را نشان می‌دهند. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهاست.

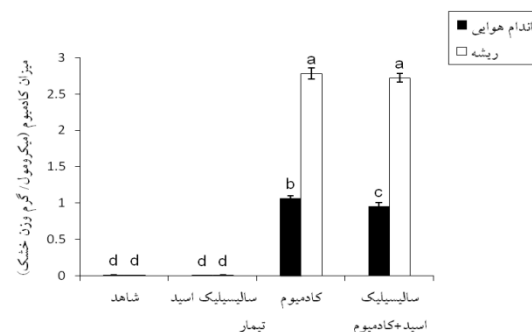


بخش هوایی بود. همچنین، سالیسیلیک اسید تأثیری در میزان کادمیوم ریشه و بخش هوایی در گیاهان شاهد نداشت و در گیاهان تیمار شده با کادمیوم، میزان کادمیوم را در بخش هوایی کاهش داد (۱۰ درصد)، در



شکل ۲- اثر متقابل سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر میزان عناصر الف) پتاسیم و ب) کلسیم در بخش هوایی در گیاهچه‌های ۲۰ روزه سویا. مقادیر میانگین \pm انحراف معیار را نشان می‌دهند. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهاست.

شکل ۳- اثر متقابل سالیسیلیک اسید و کادمیوم بر میزان کادمیوم در ریشه و بخش هوایی گیاهچه‌های ۲۰ روزه سویا. مقادیر میانگین \pm انحراف معیار را نشان می‌دهند. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهاست.



الکتریکی و میزان عناصر اندازه گیری شده در اندام هوایی و برگ را نشان داد. ارتباط معکوسی میان درصد نشت الکتریکی و وزن تر و خشک در ریشه‌ها و ساقه‌ها مشاهده شد. ارتباط میان میزان کادمیوم با وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه‌ها نیز معکوس بود. مطابق نتایج جدول هیچ

همبستگی میان شاخص‌های رشد با رنگیزه‌های فتوستتزی، درصد نشت الکترولیتی و میزان عناصر مطابق نتایج جدول ۳، تحلیل‌های رگرسیون همبستگی معنی داری میان تمام شاخص‌های رشد ریشه و ساقه با میزان رنگیزه‌های کلروفیلی، کارتنوئیدی، درصد نشت

گونه ارتباط معنی‌داری میان کادمیوم اندام هوایی و ریشه‌ها بر وزن تر اندام هوایی و ریشه‌ها مشاهده نشد.

جدول ۳- همبستگی میان شاخص‌های رشد ریشه و ساقه با رنگیزه‌های فتوسنتزی، درصد نشت الکترولیتی و میزان عناصر (اعداد جدول مقادیر r^2 هستند و علامت (-) معکوس بودن رابطه همبستگی را نشان می‌دهد).

| وزن تر | وزن خشک | طول اندام هوایی | وزن تر | وزن خشک | طول اندام هوایی | طول ریشه |
|--------|---------|-----------------|--------|---------|-----------------|----------|
| ۰/۹۹۹ | ۰/۸۴۷ | ۰/۹ | ۰/۹۹۴ | ۰/۸۴۷ | ۰/۹ | ۰/۹۳۹ |
| ۰/۸۷۳ | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۹۵ | ۰/۸۹ | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۹۵ | ۰/۹۷۴ |
| ۰/۸۴۵ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۹ | ۰/۸۵۷ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۹ | ۰/۹۴۷ |
| ۰/۹۷۶ | ۰/۷۶۲ | ۰/۸۶۷ | ۰/۹۵۴ | ۰/۷۶۲ | ۰/۸۶۷ | ۰/۸۸۲ |
| -۰/۹۳۶ | -۰/۹۷۵ | -۰/۹۸۸ | -۰/۹۵۳ | -۰/۹۷۵ | -۰/۹۸۸ | -۰/۹۹۸ |
| ۰/۸۲۷ | ۰/۹۴۴ | ۰/۹۸۵ | ۰/۸۷۸ | ۰/۹۴۴ | ۰/۹۸۵ | ۰/۹۷ |
| ۰/۷۶۲ | ۰/۸۹۹ | ۰/۹۱۶ | ۰/۸۰۹ | ۰/۸۹۹ | ۰/۹۱۶ | ۰/۹۱۶ |
| -۰/۶۶۴ | -۰/۸۷۳ | -۰/۹۵۸ | -۰/۶۹۷ | -۰/۸۷۳ | -۰/۹۵۸ | -۰/۸۳۹ |
| -۰/۶۱ | -۰/۷۹۵ | -۰/۸۸۳ | -۰/۶۴۴ | -۰/۷۹۵ | -۰/۸۸۳ | -۰/۷۹۳ |

بحث و نتیجه‌گیری

طبق نتایج این پژوهش، تأثیر مثبت سالیسیلیک‌اسید بر شاخص‌های رشد (جدول ۱) و فتوسنتز (میزان کلروفیل و کاروتنوئیدها) (جدول ۲) در گیاهچه‌های سویا تحت تنش کادمیوم تأیید شده است. مهار شاخص‌های رشد (وزن تر، خشک و طول ریشه و اندام هوایی) و رنگیزه‌های فتوسنتز در گیاهچه‌هایی که به مدت ۲۰ روز با غلظت ۲۰۰ میکرومولار کادمیوم رشد یافتند مشاهده شد و پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید به مدت ۶ ساعت میزان این شاخص‌ها را افزایش و در نتیجه آسیب اکسیداتیو ناشی از کادمیوم را کاهش داد. افزایش در شاخص‌های رشد گیاهان تحت تنش کادمیوم در پاسخ به سالیسیلیک‌اسید ممکن است با افزایش میزان کلروفیل، تغییرات در مواد معدنی و نقش حفاظتی غشاها مرتبط باشد که تحمل گیاه را در برابر آسیب افزایش می‌دهد. بررسی همبستگی بین شاخص‌های رشد و میزان

رنگیزه‌های کلروفیلی، کاروتنوئیدی، درصد نشت الکتریکی و میزان عناصر (جدول ۳) نیز این فرضیه را تأیید می‌کند. محققان دیگر نیز گزارش‌های مشابهی را ارائه کرده‌اند (Belkhadi *et al.*, 2010). مهار شاخص‌های رشد توسط کادمیوم و القای رشد توسط سالیسیلیک‌اسید توسط Choudhury و Pand (۲۰۰۴) در برنج، Metwally و همکاران (۲۰۰۳) در جو و Krantev و همکاران (۲۰۰۸) در ذرت نیز گزارش شده است.

مهار رشد توسط کادمیوم می‌تواند به علت مهار تقسیم سلولی و سرعت تولید شدن سلول‌ها باشد که اغلب توسط مهار غیر قابل برگشت پمپ پروتون که مسؤول این فرآیند است، رخ می‌دهد (Aidid and Popova, Okamoto, 1993; Liu *et al.*, 2003/4) و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که با افزایش غلظت کادمیوم، میزان کلروفیل و نیز وزن تر ریشه و بخش هوایی در گیاهان نخود کاهش یافته که به کاهش رشد

توسط Szalai و همکاران (۲۰۰۵) در ذرت گزارش شده است.

میزان کادمیوم ریشه و بخش هوایی در غیاب کادمیوم در محیط کشت پایین بوده، به شدت پس از تیمار با کادمیوم افزایش یافته است. کادمیوم معمولاً در ریشه‌ها تجمع می‌یابد، چون ریشه نخستین اندامی است که در معرض فلزات سنگین در خاک قرار می‌گیرد، با وجود این، به بخش هوایی نیز منتقل می‌شود (Caltado *et al.*, 1983; Metwally *et al.*, 2003).

تحقیق حاضر میزان کادمیوم در بخش هوایی توسط سالیسیلیک اسید کاهش یافته، در حالی که کاهش معنی‌داری در میزان کادمیوم ریشه مشاهده نشده است (شکل ۳). Panda و Choudhury (۲۰۰۴) گزارش کردند که میزان کادمیوم در ریشه‌های فاقد سالیسیلیک اسید بیشتر از ریشه‌های دارای سالیسیلیک اسید بوده است. تجمع متمایز کادمیوم به عنوان یکی از آثار فیزیولوژیک مؤثر سالیسیلیک اسید بر گیاهان است. سالیسیلیک اسید باعث کاهش جذب کادمیوم در شاهدانه (*Cannabis sativa*) شده، در نتیجه سمیت کادمیوم را کاهش داده است (Shi *et al.*, 2009). در *Cassia tora* تیمار سالیسیلیک اسید در غلظت‌های مختلف، تجمع آلومینیم را کاهش داده است (Yang *et al.*, 2003). مقاومت به فلزات سنگین از طریق انحصار انتخابی کادمیوم، جذب پایین‌تر یا خروج فعال از ریشه‌ها، یعنی از طریق مکانیسم‌هایی که به میزان پایین‌تر کادمیوم سیتوپلاسمی منجر می‌شود، حاصل می‌شود (Hall, 2002). اگرچه سالیسیلیک اسید در نمو و پیشرفت علایم تنش شرکت می‌کند، این هورمون برای فرآیند سازش و القای تحمل به تنش نیز

منجر می‌شود و پیش‌تیمار بذرها را نخود به مدت ۶ ساعت با ۵۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید پیش از مواجهه با کادمیوم تأثیر مثبتی بر رشد و میزان کلروفیل داشته، به کاهش آسیب اکسیداتیو ایجاد شده توسط کادمیوم منجر شده است. علت تأثیر مهاری کادمیوم بر میزان کلروفیل عمدتاً به علت تخریب ساختار کلروپلاست، مهار سنتز کلروفیل و افزایش سرعت تجزیه کلروفیل است (Djebali *et al.*, 2005; Lopez-Millan *et al.*, 2009).

اثر مثبت سالیسیلیک اسید در گیاهان مختلفی تحت شرایط تنش غیر زیستی گزارش شده است که به نقش سالیسیلیک اسید در جذب عناصر غذایی، توانایی فتوسنتز و رشد نسبت داده شده است (Khan *et al.*, 2003; Arfan *et al.*, 2007; Popova *et al.*, 2009). سالیسیلیک اسید آثار زیان‌آور کادمیوم را بر رشد گیاهان کتان کاهش داده است (Belkhadi *et al.*, 2010). این اثر سالیسیلیک اسید بر رشد گیاهان مواجه شده با کادمیوم موافق با نتایج Drazic و همکاران (۲۰۰۶) در نشاهای یونجه و نتایج Panda و Parta (۲۰۰۷) در نشاهای ذرت است. ممانعت سالیسیلیک اسید از پیشرفت آسیب جمعی در پاسخ به کادمیوم فرضیه‌ای است که تأثیر مثبت سالیسیلیک اسید بر فتوسنتز در گیاهان نخود مواجه شده با تنش کادمیوم را نشان می‌دهد. این فرضیه با استفاده از مقادیر کمتر کادمیوم در ریشه گیاهان نخود پیش‌تیمار شده با سالیسیلیک اسید مورد تأیید قرار گرفته است. به طور آشکار، مقادیر پایین کادمیوم در گیاهان نخود پیش‌تیمار شده با سالیسیلیک اسید آثار مضر کادمیوم را کاهش داده، اثر قابل توجهی بر رشد و فتوسنتز اعمال کرده است (Popova *et al.*, 2008). داده‌های مشابه

در این تحقیق، پیش تیمار سالیسیلیک‌اسید سطح نشت الکترولیتی ناشی از کادمیوم را کاهش داد (شکل ۱) که نشان‌دهنده نقش آن در حفاظت در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش کادمیوم است. این نتایج موافق با نتایج Krantev و همکاران (۲۰۰۸) در گیاه ذرت است. Popova و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که سرعت نشت الکترولیتی در گیاهان نخود تیمار شده با کادمیوم بیشتر از گیاهان شاهد بوده است. این مطلب مؤید این است که سمیت کادمیوم در گیاهان با فرآیند تولید رادیکال آزاد در ترکیبات غشا مرتبط است که به تغییراتی در پایداری غشا و افزایش نفوذپذیری آنها منجر می‌شود. نشان داده شده که در گیاه کتان نفوذپذیری غشا به طور معنی‌داری با تنش کادمیوم در اثر آسیب اکسیداتیو افزایش یافته که این آسیب اکسیداتیو توسط پیش تیمار سالیسیلیک‌اسید کاهش یافته است (Belkhadi *et al.*, 2010).

طبق نتایج این تحقیق، پیش تیمار سالیسیلیک‌اسید به افزایش میزان عناصر پتاسیم و کلسیم در بخش هوایی گیاهان سویا تیمار شده با کادمیوم منجر شده است (شکل ۲). در واقع کاربرد کادمیوم می‌تواند باعث کاهش عناصر پرمصرف و ریز مغذی‌ها در گیاهان شود که قادر به ایجاد تغییرات دیگر در متابولیسم گیاه می‌شوند (Hernandez and Cooke, 1997; Larbi *et al.*, 2002; Ramos *et al.*, 2002). کادمیوم به طور مشخص باعث اختلال در تعادل یونی می‌شود، ولی سالیسیلیک‌اسید می‌تواند این اختلال را تعدیل کند. محققان نشان دادند که کاهش در میزان پتاسیم القا شده توسط کادمیوم به علت کاهش جذب پتاسیم ناشی از اثر کادمیوم است (Hernandez and Cooke, 1997;

مورد نیاز است. اکثر تنش‌های غیر زیستی غلظت سالیسیلیک‌اسید گیاه را افزایش می‌دهند که به نقش آن در پیام‌رسانی تنش اشاره دارد (Krantev *et al.*, 2008; Popova *et al.*, 2008).

اگرچه سالیسیلیک‌اسید اثر مفیدی بر فتوسنتز و میزان کلروفیل در برابر تنش کادمیوم دارد، خود ترکیب نیز می‌تواند برای گیاهان تنش‌زا باشد. اثر سالیسیلیک‌اسید بستگی به مدت زمان تیمار دارد (Krantev *et al.*, 2008). چنانچه در این پژوهش، سالیسیلیک‌اسید در گیاهان شاهد میزان کلروفیل *a* و نیز کاروتنوئیدها را کاهش داد. در گیاهان عالی، کاروتنوئیدها باعث حفاظت از دستگاه فتوسنتزی در برابر فوتون‌های اضافی و تنش اکسیداتیو می‌شوند (Young, 1991). طبق نتایج این تحقیق (جدول ۲) سالیسیلیک‌اسید میزان کاروتنوئیدها را در برگ گیاهچه‌های سویا تحت تیمار با کادمیوم افزایش داد که موافق با نتایج Belkhadi و همکاران (۲۰۱۰) در گیاهان کتان تحت تیمار کادمیوم و نیز El-Tayeb و همکاران (۲۰۰۶) در گیاهان آفتابگردان تحت تنش مس است.

نتایج نشان دادند که نسبت کلروفیل *a/b* در گیاهان تحت تنش با کادمیوم نسبت به گیاهان شاهد بیشتر بود که نشان‌دهنده این است که کادمیوم اثر مهاری بیشتری بر کلروفیل *b* در مقایسه با کلروفیل *a* داشته است (جدول ۲). به کار بردن سالیسیلیک‌اسید این نسبت را در گیاهان تحت تنش با کادمیوم کاهش داده است. این نتایج موافق با گزارش‌های El-Tayeb و همکاران (۲۰۰۶) در گیاهان آفتابگردان تحت تنش مس و Moharekar و همکاران (۲۰۰۳) در گیاهان گندم است.

سالیسیلیک اسید به طور معنی داری غلظت پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن را در ریشه‌ها افزایش و در بخش هوایی کاهش داده است (Belkhadi *et al.*, 2010). اطلاعات اندکی در مورد تأثیر سالیسیلیک اسید بر جذب مواد غذایی تحت سمیت فلزات سنگین وجود دارد، به علاوه نتایج به طور معنی داری متفاوت هستند، بنابراین، نحوه مکانیسم آن باید بیشتر تحقیق و بررسی شود. مشخص شده که H^+ -ATPase در غشای پلاسمایی نقش مهمی در انتقال چندین یون ایفا می‌کند و تحقیقاتی وجود دارد که نشان‌دهنده این است که سالیسیلیک اسید قادر به القای فعالیت H^+ -ATPase است که به افزایش جذب عناصر تحت سمیت فلزات سنگین منجر می‌شود (Gordon *et al.*, Palmgren and Harper, 1999; 2004).

به طور کلی، سالیسیلیک اسید از طریق تأثیر مثبت بر شاخص‌های رشد، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل و کاروتنوئیدها)، استحکام غشا و در نتیجه کاهش درصد نشت الکترولیتی و نیز کاهش میزان کادمیوم و افزایش میزان عناصر پتاسیم و کلسیم در بخش هوایی باعث ایجاد حفاظت نسبی در برابر سمیت کادمیوم در نشاهای سویا شده است.

(Murphy *et al.*, 1999). سالیسیلیک اسید مولکولی پیام‌رسان است که قادر به تغییر ویژگی‌های غشای پلاسمایی و تأثیر بر فعالیت کانال یونی است که در نتیجه به تعادل عناصر غذایی در گیاهان تحت تنش فلزات سنگین منجر می‌شود (Katz *et al.*, 2002). Ahmad و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که غلظت منیزیم، سولفور و منگنز در برگ‌های گیاهان خردل کاهش یافت اما کاربرد خارجی سالیسیلیک اسید اثر منفی کادمیوم بر این عناصر را کاهش داد. Shi و Zhu (۲۰۰۸) نیز نشان دادند که منگنز اضافی به کاهش غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، آهن و روی در ریشه، ساقه و برگ و نیز کاهش غلظت پتاسیم در ریشه و غلظت مس در برگ و ساقه منجر شده، اضافه کردن سالیسیلیک اسید انتقال آن را از محلول غذایی به گیاهان خیار القا کرده است. تغییر در غلظت این عناصر در گیاهان خیار نشان می‌دهد که منگنز اضافی تعادل یونی را به شدت بر هم می‌زند و اضافه کردن سالیسیلیک اسید باعث تحریک حفظ و بقای آنها می‌شود. در گیاهچه‌های کتان غلظت کلسیم، منیزیم و آهن تحت تأثیر کادمیوم کاهش یافته است و تیمار سالیسیلیک اسید باعث القای انتقال آنها از محلول غذایی به گیاهان می‌شود. در واقع، پیش تیمار با

منابع

مجنون حسینی، ن. (۱۳۷۵) حبوبات در ایران. مؤسسه نشر جهاد وابسته به جهاد دانشگاهی، قم.

Ahmad, P., Nabi, G. and Ashraf, M. (2010) Cadmium-induced oxidative damage in mustard *Brassica juncea* (L.) plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany* 77(1): 36-44.

Aidid, S. B. and Okamoto, H. (1993) Responses of elongation rate, turgor pressure and cell

لطیفی، ن. (۱۳۷۲) زراعت سویا (زراعت- فیزیولوژی- مصارف). انتشارات جهاد دانشگاهی، مشهد.

wall extensibility of stem cells of *Impatiens balsamina* to lead, cadmium and zinc. *Bio Metals* 6: 245-249.

Arfan, M., Athar, H. R. and Ashraf, M. (2007) Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two

- differently adapted spring wheat cultivars under salt stress? *Journal of Plant Physiology* 164: 685-694.
- Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24: 1-15.
- Babula, P., Adam, V., Opatrilova, R., Zehnalek, J., Havel, L. and Kizek, R. (2008) Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters* 6: 189-213.
- Belkhadi, A., Hediji, H., Abbes, Z., Nouairi, I., Barhoumi, Z., Zarrouk, M., Chabi, W. and Djebali, W. (2010) Effects of exogenous salicylic acid pre-treatment on cadmium toxicity and leaf lipid content in *Linum usitatissimum* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 73: 1004-1011.
- Callahan, D. L., Baker, A. J. M., Kolev, S. D. and Wedd, A. G. (2005) Metal ion ligands in hyperaccumulating plants. *Journal of Biological Inorganic Chemistry* 11: 2-12.
- Caltado, D. A., Garland, T. R. and Wildung, R. E. (1983) Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. *Plant Physiology* 73: 844-848.
- Choudhury, S. and Panda, S. K. (2004) Role of salicylic acid in regulating cadmium induced oxidative stress in *Oryza Sativa* L. roots. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 30: 95-110.
- Dionsio-Sese, M. L. and Tobita, S. (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science* 135: 1-9.
- Djebali, W., Zarrouk, M., Brouquisse, R., Elkahoui, S., Limam, F., Ghorbel, M. H. and Chaibi, W. (2005) Ultrastructure and lipid alterations induced by cadmium in tomato (*Lycopersicon esculentum*) chloroplast membranes. *Plant Biology* 7: 258-268.
- Drazic, G., Mihailovic, N. and Lojic, M. (2006) Cadmium accumulation in *Medicago sativa* seedlings treated with salicylic acid. *Plant Biology* 50: 239-244.
- Eckardt, N. A. (2003) A new twist on the systemic acquired resistance: redox control of the NPR1-TGA1 interaction by salicylic acid. *Plant Cell* 15: 1947-1949.
- El-Tayeb, M. A. El-Enany, A. E. and Ahmed, N. L. (2006) Salicylic acid-induced adaptive response to copper stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Plant Growth Regulation* 50: 191-199.
- Gordon, L. K., Minibayeva, F. V., Rakhmatullina, D. F., Alyabyev, A. J., Ogorodnikova, T. I., Loseva, N. L. and Valitova, Y. N. (2004) Heat production of wheat roots induced by the disruption of proton gradient by salicylic acid. *Thermochimica Acta* 422: 101-104.
- Guo, B., Liang, Y. C., Zhu, Y. G. and Zhao, F. J. (2007) Role of salicylic acid in alleviating oxidative damage in rice roots (*Oryza sativa*) subjected to cadmium stress. *Environmental Pollution* 147: 743-749.
- Hall, J. L. (2002) Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany* 366: 1-11.
- He, Y. L., Liu, Y. L., Chen, Q. and Bian, A. H. (2002) Thermotolerance related to antioxidation induced by salicylic acid and heat hardening in tall fescue seedlings. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* 28: 89-95.
- Hernandez, L. E. and Cooke, D. T. (1997) Modifications of the root plasma membrane lipid composition of cadmium-treated *Pisum sativum*. *Journal of Experimental Botany* 48: 1375-1381.
- Katz, V., Fuchs, A. and Conrath, U. (2002) Pretreat with salicylic acid primes parsley cells for enhanced ion transport following elicitation. *FEBS Letters* 520: 53-57.
- Khan, W., Prithviraj, B. and Smith, D. L. (2003) Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. *Journal of Plant Physiology* 160: 485-492.
- Klessig, D. F., Durner, J., Noad, R., Navarre, D. A., Wendehenne, D., Kumar, D., Zhou, J. M., Shah, J., Zhang, S. and Kachroo, P. (2000) Nitric oxide and salicylic acid

- signaling in plant defense. *Proceedings National Academic Science* 97: 8849-8855.
- Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G. and Popova, L. (2008) Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Journal of Plant Physiology* 165: 920-931.
- Larbi, A., Morales, F., Abadia, A., Gogorcena, Y., Lucena, J. and Abada, J. (2002) Effect of Cd and Pb in sugar beet plants grown in nutrient solution: induced Fe deficiency and growth inhibition. *Functional Plant Biology* 29: 1453-1464.
- Lichtenthaler, H. (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods of Enzymology* 148: 350-382.
- Liu, D., Jiang, W. and Gao, X. (2003/4) Effect of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tip cells of garlic. *Plant Biology* 47(1): 79-83.
- Lopez-Millan, A. F., Sagardoy, R., Solanas, M., Abadya, A. and Abad, J. (2009) Cadmium toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown in hydroponics. *Environmental and Experimental Botany* 65: 376-385.
- Metwally, A., Finkemeier, I., Georgi, M. and Dietz, K. J. (2003) Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiology* 132: 272-281.
- Moharekar, S. T., Lokhand, S. D., Hara, T., Tanaka, R., Tanaka, A. and Chavan, P. D. (2003) Effect of salicylic acid on chlorophyll and carotenoids contents of wheat and moong seedlings. *Photosynthetica* 41: 315-317.
- Murphy, A., Eisinger, W., Shaff, J., Kochien, L. and Taiz, L. (1999) Early copper induced leakage of K⁺ from Arabidopsis seedlings is mediated by ion channels and coupled to citrate efflux. *Plant Physiology* 121: 1375-1382.
- Murtaza, G., Asghar, R. and Abdul Majid, S. (2010) Changes in specific activity of ascorbate peroxidase during seed development of pea (*Pisum sativum* L.) treated with salicylic acid. *African Journal of Biotechnology* 9: 5333-5337.
- Palmgren, M. G. and Harper, J. F. (1999) Pumping with plant P-type ATPases. *Journal of Experimental Botany* 50: 883-893.
- Panda, S. K. and Patra, H. K. (2007) Effect of salicylic acid potentiates cadmium-induced oxidative damage in *Oryza sativa* L. leaves. *Acta Physiologiae Plantarum* 29: 567-575.
- Popova, L., Maslenkova, L., Yordanova, R., Ivanova, A., Krantev, A., Szalai, G. and Janda, T. (2009) Exogenous treatment with salicylic acid attenuates cadmium toxicity in pea seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 47: 224-231.
- Popova, L., Maslenkova, L., Yordanova, R., Krantev, A., Szalai, G. and Janda, T. (2008) Salicylic acid protects photosynthesis against cadmium toxicity in pea plants. *Plant Physiology* 34: 133-148.
- Ramos, I., Esteban, E., Lucena, J. J. and Garate, A. (2002) Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca sativa* sp. Cd Mn interaction. *Plant Science* 162: 761-767.
- Rao, M. V., Paliyath, G., Ormord, D. P. and Watkins, C. B. (1997) Influence of salicylic acid on H₂O₂ production, oxidative stress and H₂O₂ metabolizing enzymes. *Plant Physiology* 115: 137-149.
- Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Borhidi, A. and Berazain, R. (1999) Nickel hyper accumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany* 83: 29-38.
- Shi, G. R., Cai, Q. S., Liu, Q. Q. and Wu, L. (2009) Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in hemp plants in relation to cadmium uptake, photosynthesis and antioxidant enzymes. *Acta Physiologia Plantarum* 31: 969-977.
- Shi, Q. and Zhu, Z. (2008) Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber. *Environmental and Experimental Botany* 63: 317-326.

- Szalai, G., Pal, M., Horvath, E., Janda, T. and Paldi, E. (2005) Investigations on the adaptability of maize lines and hybrids to low temperature and cadmium. *Acta Agronomica Hungarica* 53: 183-196
- Wu, H. S., Raza, W., Fan, J. Q., Sun, Y. G., Bao, W., Liu, D. Y., Huang, Q. W., Mao, Z., Shen, Q. R. and Miao, W. G. (2008) Antibiotic effect of exogenously applied salicylic acid on *in vitro* soilborne pathogen, *Fusarium oxysporum* sub sp. niveum. *Chemosphere* 74: 45-50.
- Yang, Z. M., Wang, J., Wang, S. H. and Xu, L. L. (2003) Salicylic acid induced aluminium tolerance by modulation of citrate efflux from roots of *Cassia tora* L. *Planta* 217: 168-174.
- Young, A. J. (1991) The photoprotective role of carotenoids in higher plants. *Plant Physiology* 83: 702-708.
- Zawoznik, M. S., Groppa, M. D., Tomaro, M. L. and Benavides, M. P. (2007) Endogenous salicylic acid potentiates cadmium-induced oxidative stress in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 173: 190-197.

Interaction of salicylic acid and cadmium on growth, photosynthetic pigments and ion distribution in aerial parts of soybean plantlets

Rayhaneh Amooaghaie *, Elham Marefat and Leila Shabani

Department of Biology, Faculty of Sciences, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Abstract

In this study, the role of salicylic acid in cadmium induced physiological changes was investigated in solid hydroponic culture in soybean plantlets. After presoaking soybean sterilized seeds in 0.5 mM SA solution for 6 hrs, seeds were transferred to pots containing perlite and then they were irrigated with Hoagland nutrient solution (full strength) containing 200 μ M CdCl₂ for 20 days. After harvesting the plantlets and calculation of growth parameters (root and shoot dry and fresh weight and length), photosynthetic pigments contents (chl a and b), electrolyte leakage in leaves, and cadmium content (in the roots and the shoots) as well as Ca and K content in shoots, it came to our knowledge that salicylic acid had little effect on these parameters in the absence of cadmium, but in the presence of cadmium, SA increased growth parameters, photosynthetic pigments contents, Ca and K content in shoots, against decreased electrolyte leakage in leaves and cadmium content in aerial parts of plant. Therefore, SA could reduce cadmium toxicity and protect growth potential of plant by changing plant strategy in translocation of elements to aerial parts of plant and inhibition of electrolyte leakage and protection of photosynthetic pigments.

Key words: Salicylic acid, Growth, Soybean, Cadmium, Electrolyte leakage

* Corresponding Author: rayhanehamooaghaie@yahoo.com