

اثر متیل جاسمونات بر جذب و تجمع سرب در گیاه تربچه (*Raphanus sativus* L.)

زهرا دستجردی، اکبر صفی پور افشار* و فاطمه سعید نعمت پور

گروه زیست شناسی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۳/۰۸/۳)

چکیده:

فلزات سنگین از مهم‌ترین آلاینده‌ها در محیط زیست به شمار می‌روند. ورود فلزات سمی از طریق فعالیت‌های انسانی باعث آلودگی بسیاری از خاک‌ها شده است. حضور این فلزات در خاک و تجمع آن‌ها در گیاهان رشد یافته در این خاک‌ها اثرات سوء بر مصرف کنندگان خواهد داشت. یک رویکرد برای کاهش تجمع فلزات سنگین در گیاهان استفاده از هورمون‌های گیاهی است. این تحقیق به منظور بررسی تاثیر متیل جاسمونات بر تجمع سرب در گیاه تربچه (*Raphanus sativus* L.) در محیط هیدروپونیک انجام شد. سرب به صورت سولفات و با غلظت‌های صفر، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ میلی گرم در لیتر و متیل جاسمونات با غلظت‌های صفر، ۰/۰۱ و ۰/۱ میلی مولار استفاده شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد. پس از اعمال تیمارها غلظت کلروفیل‌های a و b، غلظت پرولین و میزان تجمع سرب در بخش هوایی و ریشه‌ای گیاهان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سرب باعث کاهش مقدار کلروفیل‌های a و b و افزایش غلظت پرولین به طور معنی‌دار شد که با اسپری برگ متیل جاسمونات (تیمار ۰/۰۱ میلی مولار) غلظت کلروفیل افزایش یافت. افزون بر آن تیمار متیل جاسمونات در حضور سرب باعث افزایش معنی‌دار غلظت پرولین شد. رشد گیاهان در محیط حاوی سرب سبب تجمع این فلز در بخش هوایی و ریشه شد، به طوری که غلظت سرب در ریشه به صورت معنی‌داری از بخش هوایی بیشتر بود و اسپری متیل جاسمونات در هر دو غلظت سبب کاهش تجمع سرب هم در ریشه و هم در بخش هوایی گردید. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش به نظر می‌رسد که گیاه تربچه گیاهی مستعد ذخیره فلزات سنگین مانند سرب در بخش خوراکی می‌باشد که این سمیت را می‌توان با استفاده از غلظت‌های مناسب متیل جاسمونات کاهش داد.

کلمات کلیدی: پرولین، تربچه، فلز سنگین، جاسمونات.

مقدمه:

سانتی‌گرا است. این عنصر در خاک به مقدار بسیار کم یافت می‌شود اما مقدار آن از طریق پساب‌های صنعتی، مصرف سوخت‌های فسیلی و کودهای شیمیایی مدام در حال افزایش است. سرب و ترکیبات آن قابل تجزیه نبوده و به راحتی وارد زنجیره غذایی شده و سلامت موجودات زنده را تهدید می‌کند. همچنین زیان سرب بیشتر ناشی از توان جابجایی کم و رسوب پذیری بالای آن است (Tassi et al., 2008). سرب طیف وسیعی از آسیب‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را در گیاهان سبب می‌شود که می‌توان به کاهش رشد، مهار جوانه‌زنی،

فلزات سنگین به عنوان یک مسئله خطر ساز از ابعاد مختلف، به طور جدی می‌توانند زیست انسان و سایر موجودات زنده را به خطر بیندازند. یکی از عمده‌ترین منابع تولید کننده این فلزات، سنگ‌های معادن و غبارهای آتشفشانی می‌باشد ولی در کنار این‌ها انسان خود به اشکال مختلف مانند صنایع رنگرزی، آبکاری فلزات و باطری سازی در انتشار فلزات سنگین نقش دارد (Aldrich and Feng, 2000). سرب فلزی سنگین به رنگ خاکستری مایل به آبی، عدد اتمی ۸۲ و نقطه ذوب ۳۲۷ درجه

جلوگیری از سنتز کلروفیل و ایجاد تنش اکسیداتیو (Ruciska-Sobkowiak and Pukacki, 2006) اشاره کرد.

استفاده از هورمون‌های گیاهی در راستای کاهش جذب و تجمع فلزات سنگین در گیاهان می‌تواند روش مناسبی برای کاهش آسیب‌های مربوطه باشد. در همین رابطه گزارشاتی در خصوص کاربرد این هورمون‌ها و اثرات مفید آنها وجود دارد (Maksymiec and Krupa, 2006; Maksymiec et al., 2007). جاسمونات‌ها از تنظیم‌کننده‌های مهم سلولی بوده و در فرایندهای نموی مختلف گیاه شامل جوانه‌زنی دانه، رشد ریشه، باروری، رسیدن میوه و پیری دخالت دارند به علاوه جاسمونات‌ها به عنوان یک ملکول پیام رسان با فعال کردن مسیرهای پیام رسانی، تحمل گیاه به تنش‌های غیر زیستی مانند تنش فلزات سنگین را افزایش می‌دهند (Poschenrieder et al., 2008). این هورمون گیاهی با فعالیت آنزیم لیپوکسیژناز و از پراکسیدهای لیپیدی تشکیل می‌شود. گزارشاتی وجود دارد که این هورمون در نتیجه تنش اکسیداتیو القاء شده با فلزات سنگین نیز تولید می‌شود. در واکنش گیاهان به تنش، جاسمونات‌ها به عنوان کدکننده ژن‌های پروتئین‌های بازدارنده نظیر تئونین، هیدروکسی پرولین و پرولین عمل می‌کنند و به طور کلی با فعال سازی مکانیسم‌های دفاعی، گیاه را در کاهش جذب و تجمع فلزات سنگین یاری می‌رسانند (Piotrowska et al., 2009).

تربچه گیاهی است یک ساله و علفی از خانواده‌ی شب بو و به عنوان سبزی خوردن در مناطق مختلف ایران کشت می‌شود. بخش خوراکی این گیاه سبتر و در تماس مستقیم با خاک قرار دارد. بنابراین فلزات سنگین به راحتی در آن تجمع یافته و برای مصرف کنندگان مضر خواهد بود. هدف از این تحقیق ارزیابی توانایی هورمون متیل جاسمونات در کاهش جذب و تجمع فلز سرب در گیاه خوراکی تربچه است.

مواد و روش‌ها:

کشت و تیمار گیاهان: این آزمایش در آزمایشگاه تحقیقات گیاهی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور و در تابستان ۱۳۹۱ انجام شد. بذره‌های سالم پس از شستشو به مدت ۲ دقیقه در هیپوکلریت سدیم ۲٪ ضد عفونی شدند و درون پتری دیش

های اتوکلاو شده به روش بین کاغذی کشت داده شدند. پتری دیش‌ها حاوی بذور ابتدا در اتاقک رشد و در تاریکی و دمای 25°C قرار گرفتند. سپس گیاهچه‌های دو روزه تربچه به داخل گلدان‌های پلی اتیلنی حاوی محیط کشت هوگلند-آرنون (Hoagland and Arnon, 1950) که سطح آنها با پوشش آلومینیومی پوشانده شده بود، منتقل شدند. اکسیژن لازم برای تنفس ریشه‌ها از طریق پمپ‌های هوا به صورت مداوم فراهم گردید که باعث هم زدن محلول غذایی نیز می‌شد. تعداد گیاهان در هر گلدان ۶ گیاه بود. تعویض محلول‌ها هر هفت روز یکبار انجام شد و هر دو روز یکبار، محلول تبخیر شده از ظرف به وسیله آب مقطر جبران شد و pH محلول غذایی بر روی ۶/۵ تنظیم گردید. پس از رسیدن گیاهان به مرحله ۴ برگگی سرب به صورت سولفات سرب و در غلظت‌های مختلف (صفر، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ میلی گرم در لیتر) به محلول غذایی اضافه شد. متیل جاسمونات در غلظت‌های صفر، ۰/۱ و ۰/۱ میلی مولار و یک هفته پس از اعمال تیمار سرب به صورت محلول پاشی و هفته‌ای دو بار به مدت دو هفته اعمال شد. در گیاهان شاهد از آب مقطر به جای محلول هورمونی استفاده شد. گیاهان تیمار شده به مدت سه هفته در دمای $16 \pm 2^{\circ}\text{C}$: $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد و شرایط نوری ۱۶:۸ ساعت به ترتیب تاریکی: نور قرار گرفته و سپس گیاهان جهت انجام سنجش های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی مورد نظر جمع آوری شدند.

سنجش غلظت کلروفیل‌های a و b : بعد از اتمام دوره تیمار، اندازه‌گیری کلروفیل‌ها به روش Arnon (۱۹۴۹) صورت گرفت. بدین منظور ۰/۵ گرم از بخش هوایی گیاه به دقت توزین شد. نمونه‌های گیاهی با کمک ۵ میلی لیتر استون ۸۰٪ (v/v) در داخل یک هاون چینی سائیده شده و به صورت هموژن و یکنواخت درآمدند. سپس با کمک قیف شیشه‌ای و کاغذ صافی واتمن شماره ۲، محلول تهیه شده صاف گردید. حجم نهایی عصاره به دست آمده ۲۰ میلی لیتر می‌باشد.

جهت محاسبه غلظت کلروفیل‌های a و b ، جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ (D₆₄₅، D₆₆₃) توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل UV/VIS T80⁺ ساخت شرکت PG Instruments با استفاده از شاهد استون ۸۰٪ خوانده و محاسبه

گردید.

$$a = [12.7(D_{663}) - 2.69(D_{645})] \times (V/1000 \times W)$$

$$b = [22.9(D_{645}) - 4.68(D_{663})] \times (V/1000 \times W)$$

حجم کلروفیل استخراج شده بر حسب میلی لیتر = V

وزن تر بافت مورد استفاده بر حسب گرم = W

اندازه گیری غلظت پرولین: نمونه‌های گیاهی توزین شده (

یک گرم) در ۱۰ میلی لیتر محلول ۳ درصد اسید سولفوسالیسیلیک ساییده شده و سپس نمونه‌ها صاف گردید. آن‌گاه ۲ میلی لیتر معرف ناین هیدرین و ۲ میلی لیتر اسید استیک خالص به نمونه‌ها افزوده شد و لوله‌ها در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شدند. سپس لوله‌ها در حمام یخ به مدت نیم ساعت قرار گرفتند. به هر لوله آزمایش ۴ میلی لیتر تولون افزوده شد و میزان جذب لایه رنگی فوقانی (حاوی تولون و پرولین) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۴۶ نانومتر قرائت گردید. سپس محتوای پرولین هر نمونه با استفاده از رسم منحنی استاندارد بر اساس میکرو مول در میلی گرم وزن تر نمونه گیاهی محاسبه شد (Bates et al., 1975).

سنجش غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه: پس از انتقال

نمونه‌ها به آزمایشگاه، به مدت ۴۸ ساعت در آن با دمای ۶۰ درجه قرار داده شدند. سپس ریشه‌ها و اندام‌های هوایی در هاون چینی کوبیده و آسیاب گردید تا بهتر در اسید حل شود. از اندام‌های هوایی ۰/۵ گرم و از ریشه‌ها ۰/۲ گرم برداشت شده و ۲۰ سی سی اسید نیتریک ۴ نرمال به آن‌ها اضافه شد. پس از قرار دادن نمونه‌ها در حمام آب گرم (۶۰ °C) به مدت ۲ ساعت، محلول حاصل با استفاده از قیف شیشه‌ای و کاغذ صافی واتمن صاف شد و حجم نهایی به ۵۰ میلی لیتر رسانده شد (Lozak et al., 2002). در پایان غلظت سرب بر اساس میکروگرم در گرم وزن خشک اندام با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل AAS-240 ساخت شرکت Agilent Technologies اندازه‌گیری شد. برای رسم منحنی کالیبراسیون برای فلز سرب، ۱۰ استاندارد به غلظت‌های ۰/۱۰۰، ۰/۲۵۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شد.

آنالیز آماری داده‌ها: در این تحقیق آزمایش به صورت

فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم افزار SAS 9.2 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد و در مورد صفاتی که برهمکنش بین دو عامل سولفات سرب و متیل جاسمونات برای آنها معنی دار گردید، برش دهی اثر سطوح مختلف هورمون متیل جاسمونات در هر سطح سولفات سرب صورت گرفت.

نتایج:

در این پژوهش اثرات ساده و متقابل کلیه فاکتورها بر غلظت کلروفیل‌های a و b ، غلظت پرولین و غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سولفات سرب در محیط رشد گیاه، غلظت کلروفیل‌های a و b کاهش یافت اما اسپری متیل جاسمونات با غلظت ۰/۰۱ میلی مولار در گیاهان تیمار شده با سولفات سرب و همچنین شاهد سبب افزایش غلظت کلروفیل‌های a و b شد (شکل ۱ a و b). همچنین نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سولفات سرب، میزان پرولین افزایش می‌یابد و اسپری متیل جاسمونات در غلظت‌های مختلف نیز سبب افزایش مقدار پرولین شد (شکل ۱ c).

مقایسه میانگین‌ها نشان دهنده آن است که با افزایش غلظت سولفات سرب در محلول غذایی، میزان تجمع سرب در ریشه و بخش هوایی گیاه افزایش یافته است و غلظت سرب تجمع یافته در ریشه به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از بخش هوایی است. با کاربرد متیل جاسمونات از غلظت سرب تجمع یافته در بخش هوایی و ریشه گیاه به طور معنی‌داری کاسته شده است و این کاهش در همه غلظت‌های سولفات سرب استفاده شده دیده می‌شود. همچنین متیل جاسمونات در هر دو غلظت ۰/۰۱ و ۰/۱ میلی مولار سبب کاهش سرب جذب شده می‌گردد (شکل ۲ a و b).

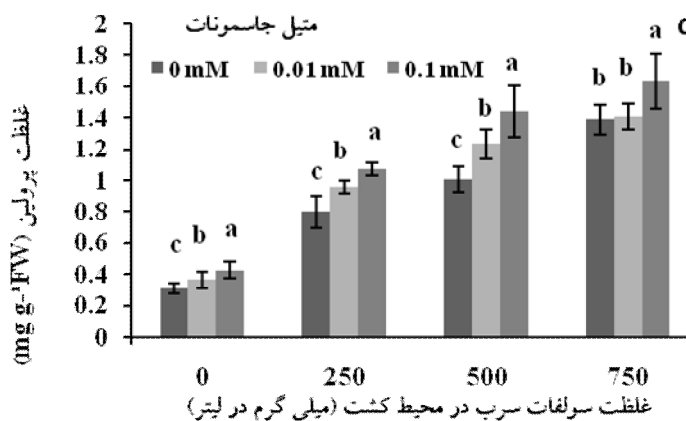
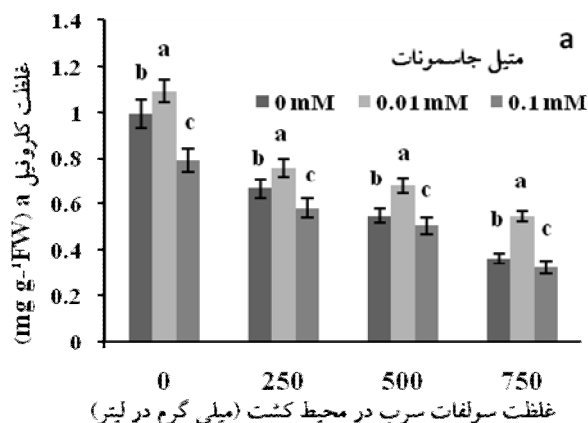
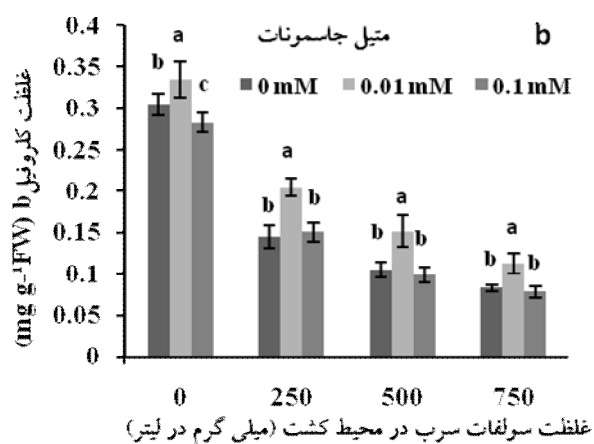
بحث:

اثر غلظت‌های مختلف سرب و متیل جاسمونات بر میزان

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه

میانگین مربعات						منابع تغییر
درجه آزادی	کلروفیل <i>a</i> میلی گرم بر گرم وزن تر	کلروفیل <i>b</i> میلی گرم بر گرم وزن تر	پرویلین	غلظت سرب در اندام هوایی	غلظت سرب در ریشه	
۲	۰/۴۷۷**	۰/۰۸۳**	۲/۰۴۷**	۸۵۶۲۹**	۲۸۹۱۷۰**	سولفات سرب
۳	۰/۱۴۶**	۰/۰۰۸**	۰/۲۱۸**	۶۳۱۳**	۲۰۹۴۸**	متیل جاسمونات
۶	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۰۲**	۰/۰۱۶**	۹۳۴**	۳۵۳۲**	سولفات سرب و متیل جاسمونات
۲۴	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۱۰	۶/۴	۱۱	خطا

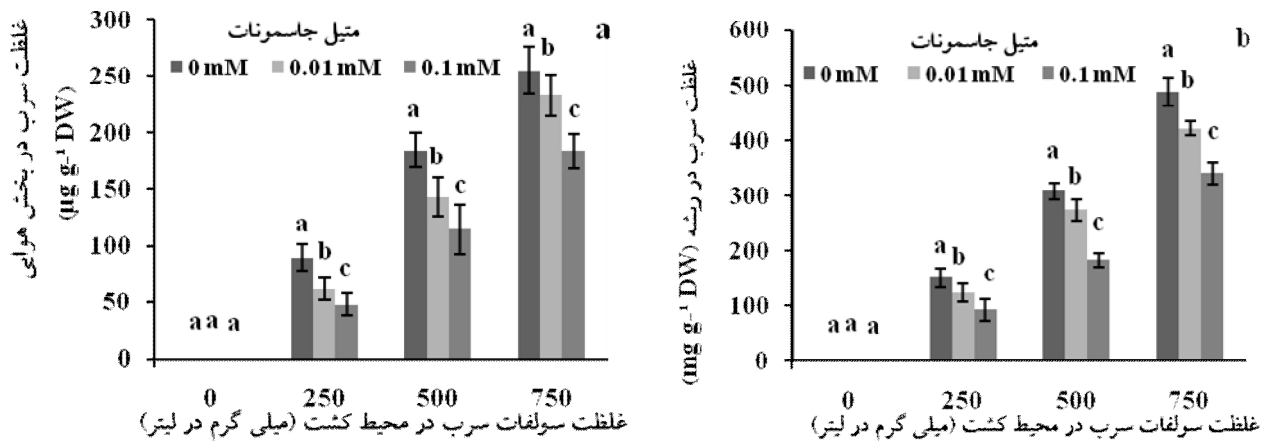
ns، *، ** به ترتیب، معنی دار بودن در سطح ۱٪ و ۵٪ و معنی دار نبودن



شکل ۱- تأثیر متقابل متیل جاسمونات و سولفات سرب بر غلظت کلروفیل *a* (a)، کلروفیل *b* (b) و پرویلین (c). میانگین ها حاصل ۳ تکرار و حروف غیر مشترک نشانه اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد بر اساس آزمون دانکن است. بارها نشاندهنده خطای استاندارد می باشند. گروه های سولفات سرب به طور مجزا مقایسه و حروف گذاری شده اند.

کلروفیل به جای Mg که مکانیسم اصلی کارکردی سمیت فلزات سنگین است، منجر به کاهش کلروفیل و شکست در فتوسنتز می شود (Sengar et al., 2008). همچنین مهار

کلروفیل: قرارگیری گیاهان در معرض غلظت های بالای فلزات سنگین موجب کاهش بیوسنتز کلروفیل می شود. گزارش شده است که جایگزین شدن Zn، Ni، Cd، Cu، Hg و Pb در



شکل ۲- تأثیر متقابل متیل جاسمونات و سولفات سرب بر غلظت سرب جذب شده در بخش هوایی (a) و ریشه گیاه تربچه (b). میانگین ها حاصل ۳ تکرار و حروف غیر مشترک نشانه اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد بر اساس آزمون دانکن است. بارها نشاندهنده خطای استاندارد می باشند. گروه های سولفات سرب به طور مجزا مقایسه و حروف گذاری شده اند.

جمله پرولین می شود. همچنین می تواند ساخت پرولین در کلروپلاست شروع شود که استخراج ماده پرولین اسید - کربوکسیلاز از کلروپلاست بر این موضوع دلالت دارد. سنتز پرولین از دو مسیر گلوتامات و آرانتین انجام می شود که افزایش پرولین به دلیل القای فعالیت آنزیم های پرولین ۵- کربوکسیلیک اسید سینتاز و پرولین ۵- کربوکسیلیک اسید ردوکتاز در شرایط تنش می باشد (Hare and Cress, 1997). پرولین علاوه بر حفظ تعادل اسمزی گیاه بعنوان پایدار کننده پروتئین ها، کلات کننده فلزی، مهار کننده پراکسیداسیون لیپیدی و حذف کننده رادیکال های آزاد شناخته می شود (Mishra and Dubey, 2006). جاسمونیک اسید نیز در شرایط تنش فلزی میزان پرولین را افزایش می دهد که به نظر می رسد در واکنش گیاهان نسبت به تنش، جاسمونیک اسید به عنوان تنظیم کننده ی ژن های پروتئین های بازدارنده نظیر تئوین، اسموتین، هیدروکسی پرولین و پرولین عمل کرده و با تنظیم افزایش آنها به ویژه پرولین سبب افزایش میزان این اسید آمینه در شرایط تنش می شود (Wasternack and Kombrink, 2009).

اثرات سرب و متیل جاسمونات بر میزان تجمع سرب در تربچه: گزارشات متعددی مبنی بر ارتباط بین جذب و تجمع سرب و فعال شدن آنزیم لیپوکسیژناز وجود دارد که این آنزیم مسئول تجزیه لیپیدها و بیوسنتز جاسمونات ها است

فرآیندهای کلیدی در بیوسنتز کلروفیل (بیوسنتز ۵ آمینو لولونیک اسید، آمینو لولونیک اسید دهیدراتاز و پرتوکلروفیل ردوکتاز)، سبب کاهش ذخیره کلروفیل در برگ ها می شود (Prasad et al., 2003). فلزات سنگین با تولید رادیکال های آزاد نیز باعث تخریب ملکول های کلروفیل می شوند و متیل جاسمونات با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز در کلروپلاست و حذف رادیکال های آزاد از تخریب رنگیزه های فتوسنتزی جلوگیری می کند (Popova, 2003; Maksymiec and Krupa, 2006). متیل جاسمونات باعث بیان ژن های آنزیم های کلیدی دخیل در بیوسنتز کلروفیل از طریق تحریک تشکیل ۵- آمینو لولونیک می گردد (Saniewski, 2006).

اثر سرب و متیل جاسمونات بر میزان پرولین: اسید آمینه پرولین فراوانترین متابولیتی است که در بسیاری از گونه های گیاهی تحت تنش های غیر زنده همانند فلزات سنگین، شوری، خشکسالی، سرما، کمبود مواد غذایی و اسیدیته بالا تجمع می یابد (Szabados and Saviouré, 2010). در پژوهش حاضر نیز گیاه تربچه به منظور دفاع در برابر تنش حاصل از فلز سنگین سرب، میزان پرولین آزاد را افزایش داد. که به نظر می رسد افزایش میزان پرولین از طریق تجزیه پروتئین ها در برگ های بالغ باشد که سبب افزایش اسیدهای آمینه آزاد از

این رابطه می‌توان اظهار داشت که بخش زیرزمینی اولین جایگاهی است که در تماس با فلز بوده و مستقیماً با فلزات محلول در خاک ارتباط دارد و بخش زیادی از سرب جذب شده، متصل به دیواره سلولی باقی می‌ماند. به طوری که گزارش شده است ۹۰ درصد کل فلزات در ریشه‌ها، در ساختار دیواره سلولی یا در فضای بین دیواره و غشا متمرکز شده و ایجاد سمیت می‌کند، بدون آن که با مواد آلی، تشکیل ترکیبات پیچیده داده و یا به اندام هوایی منتقل شود (Pourrut et al., 2011). دیواره سلولی لایه اندودرم به عنوان یک مانع برای انتشار آپوپلاستی داخل سیستم آوندی است. به طور کلی، مواد قبل از ورود به زایلیم بایستی جذب سیم پلاست شوند، همین ممانعت از انتشار آپوپلاستی فلزات سبب افزایش تجمع آن‌ها در ریشه می‌گردد (Gupta et al., 2013). همچنین ریشه‌ها به دلیل گستردگی بیشتری که نسبت به سایر قسمت‌های گیاه دارند جذب بیشتری دارند به طوری که فلزات به گیرنده‌های شیمیایی با میل ترکیبی بالا که در ریشه‌ها است متصل می‌شوند که نشان دهنده ناحیه سطحی بیشتر ریشه نسبت به بقیه قسمت‌های گیاه است (Suresh and Ravishankar, 2004). از عوامل دیگری که بر عدم تحرک فلزات سنگین تاثیر گذار هستند می‌توان به متالوتیونین‌ها اشاره کرد که فلزات سنگین با اتصال به آنها در بخش زیرزمینی باقی مانده و به بخش هوایی منتقل نمی‌شوند و افزایش بیان ژن Mt در دانه رسته‌های گیاه *Kandelia obovata* تحت تنش کادمیوم شاهدهی بر این مدعا است (Chen et al., 2014).

(Poschenrieder et al., 2006). سنتز جاسمونات‌ها در پاسخ به فلزات سنگین به دلیل نقش این فیتوهورمون در تنش‌های غیر زیستی است. به طور مثال در مطالعه انجام شده توسط Liu و همکاران (۲۰۰۹) تیمار گیاه *Arabidopsis thaliana* با نیترات سرب سبب افزایش بیان ژن‌های درگیر در مسیر بیوسنتز جاسمونیک مانند آلن اکسید سنتتاز (AOS) شد. در تحقیق حاضر کاربرد متیل جاسمونات سبب کاهش تجمع سرب در گیاه تریچه گردید. البته در مطالعات زیادی بر نقش هورمون‌های گیاهی در کاهش تجمع فلزات سنگین تاکید شده است مثلاً Krantev و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که استفاده از سالیسیلیک اسید در گیاه ذرت سبب کاهش فلز کادمیوم در ریشه‌ها شد. در مورد نقش متیل جاسمونات در کاهش تجمع سرب می‌توان این گونه بیان داشت که این هورمون به عنوان یک ملکل سیگنال بیان ژن‌های درگیر در مکانیسم‌های دفاعی گیاه از جمله مسیر بیوسنتز فیتوکلاتین‌ها را فعال می‌کند که در اتصال به یون‌های فلزی و غیر سمی کردن آن‌ها نقش دارند. در اثبات این مدعا می‌توان به تحقیق انجام شده توسط Maksymioc و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد که نشان دادند متیل جاسمونات تجمع فیتوکلاتین‌ها را در گیاه *Arabidopsis thaliana* در حضور سرب و کادمیوم سبب شده و باعث تحمل گیاه به تنش این فلزات شد. البته در مطالعه‌ای دیگر بیان گردید که نقش دفاعی جاسمونات‌ها در برابر تنش‌های غیر زیستی از طریق افزایش بیان ژن‌های درگیر در متابولیسم گلوکاتیون انجام می‌شود (Liu et al., 2009).

همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که میزان سرب در بخش زیرزمینی به مراتب بیشتر از بخش هوایی است که در

منابع:

- Chen, J., Yan, Z. and Li, X. (2014) Effect of methyl jasmonate on cadmium uptake and antioxidative capacity in *Kandelia obovata* seedlings under cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 104: 349-356.
- Gupta, D. K., Huang, H. G. and Corpas, F. J. (2013) Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research* 20: 2150-2161.
- Hare, P. and Cress, W. (1997) Metabolic implications of stress induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 21:79-102.
- Aldrich, C. and Feng, D. (2000) Removal of heavy metals from waste water effluents by biosorptive flotation, *Minerals Engineering*, 13:1199-1138
- Arnon, D. I. (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1-15.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Tears, I. D. (1975) Rapid determination of free proline in water stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207

- Bulgarian Journal of Plant Physiology, Special issue. 133-152.
- Poschenrieder, C., Gunsé, B., Corrales, I. and Barceló, J. (2008) A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of The Total Environment*, 400: 356-368.
- Poschenrieder, C., Tolra, R. and Barcelo, J. (2006) Can metals defend plants against biotic stress? *Trends in Plant Science*, 11: 288-295.
- Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P. and Pinelli, E. (2011). Lead Uptake, Toxicity, and Detoxification in Plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 213*. D. M. Whitacre, Springer New York. 213: 113-136.
- Prasad, M.N.V. and Freitas, H. (2003) Metal hyper accumulation in plants-Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6:275-321.
- Ruciska-Sobkowiak, R. and Pukacki, P. M. (2006) Antioxidative defense system in lupin roots exposed to increasing concentrations of lead. *Acta Physiologiae Plantarum*, 28: 357-364.
- Sengar, R., Gautam, M., Sengar, R., Sengar, R., Garg, S., Sengar, K. and Chaudhary, R. (2008). Lead Stress Effects on Physiobiochemical Activities of Higher Plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Vol 196*. D. M. Whitacre, Springer US. 196: 73-93.
- Suresh, B. and Ravishankar, G. (2004) Phytoremediation- A Novel and Promising Approach for Environmental Clean-up, *Critical Reviews in Biotechnology* 24:97-124.
- Szabados, L. and Savouré, A. (2010) Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science* 15: 89-97.
- Tassi, E., Pouget, J., Petruzzelli, G. and Barbaferi, M. (2008) The effects of exogenous plant growth regulators in the phytoextraction of heavy metals. *Chemosphere*, 71: 66-73.
- Wasternack, C. and Kombrink, E. (2009) Jasmonates: Structural Requirements for Lipid-Derived Signals Active in Plant Stress Responses and Development. *ACS Chemical Biology* 5: 63-77.
- Hoagland, D. R., and Arnon, D. I. (1950) The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California Agricultural Experiment Station, 347(2nd edit).
- Ibarra caballero, J., Villanueva Verdu Zco, J., Molina Galam, J. and Jimerez, E. S. D. (1988) Proline accumulation as a symptom of drought stress in maize: a tissue differentiation requirement, *Journal of Experimental Botany* 89: 889-897.
- 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.
- Liu, T., Liu, S., Guan, H., Ma, L., Chen, Z., Gu, H. and Qu, L.-J. (2009) Transcriptional profiling of *Arabidopsis* seedlings in response to heavy metal lead (Pb). *Environmental and Experimental Botany* 67: 377-386.
- Łozak, A., Sołtyk, K., Ostapczuk, P. and Fijałek, Z. (2002) Determination of selected trace elements in herbs and their infusions. *Science of the Total Environment* 289: 33-40.
- Maksymiec, W. and Krupa, Z. (2006) The effects of short-term exposition to Cd, excess Cu ions and jasmonate on oxidative stress appearing in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental and Experimental Botany*, 57: 187-194.
- Maksymiec, W., Wójcik, M. and Krupa, Z. (2007) Variation in oxidative stress and photochemical activity in *Arabidopsis thaliana* leaves subjected to cadmium and excess copper in the presence or absence of jasmonate and ascorbate. *Chemosphere*, 66: 421-427.
- Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P. and Zerbi, G. (2004) Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environmental Pollution*, 132: 21-27.
- Mishra, S., and Dubey, R. S. (2006) Heavy metal uptake and detoxification mechanisms in plants. *International Journal of Agricultural Research*, 1(2), 122-141.
- Piotrowska, A., Bajguz, A., Godlewska-Żyłkiewicz, B., Czerpak, R. and Kamińska, M. (2009) Jasmonic acid as modulator of lead toxicity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae). *Environmental and Experimental Botany*, 66: 507-513.
- Popova, L., Ananieva, V., Hristova, V., Christov, K., Georgieva, K., Alexieva, V. and Stoinova, Zh. (2003) Salicylic acid-and Methyl jasmonate-induced protection on photosynthesis to paraquat oxidative stress.