Role of salicylic acid pretreatment in alleviating cadmium-induced toxicity in *Salvia officinalis* L.

Mahyar Gerami[1*], Abazar Ghorbani[2], Somayeh Karimi[3]
[1.] Sana Institute of Higher Education, Sari, Iran
[2.] Department of Biology, Mohaghegh Ardabili University, Ardabili, Iran
[3.] Sana Institute of Higher Education, Sari, Iran

Abstract
Cadmium (Cd) is an environmentally polluting metal that has a negative effect on plant growth and yield. In this study, to understand the role of salicylic acid (SA) in alleviating cadmium toxicity in Sage (*Salvia officinalis* L.), the changes of biochemical and physiological indexes in Sage seedlings exposed to 0, 100, 200 or 300 ppm Cd with or without 0.1, 0.5 and 1 mM SA for 30 days was investigated. The results showed that Cd treatment reduced the growth, photosynthetic pigments, soluble sugars and activity of catalase and peroxidase enzymes, while increased proline content, phenolic compounds, MDA and H_2O_2. However, SA pre-treatment improved the growth and increased content of photosynthetic pigments, proline, soluble sugars and phenolic compounds at all levels of cadmium. Furthermore, SA pretreatment increased the activity of antioxidant enzymes catalase and peroxidase, and reduced MDA and H_2O_2, which reduced the cadmium-induced oxidative stress and, consequently, increased Sage tolerance to cadmium. According to our results, it seems SA might regulate the antioxidant defense activities, increase osmolyte and secondary metabolite compound in Cd-treated Sage, thereby improving growth and tolerance of Sage to Cd stress.
Keywords: Salicylic acid, Cadmium stress, *Salvia officinalis* L., Antioxidant enzyme

* Corresponding Author: mahyar.gerami@yahoo.com

Copyright©2018, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/BY-NC-ND/4.0), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

زیست‌شناسی گیاهی ایران، سال نهم، شمارهٔ سی و پنجم، بهار ۱۳۹۷، صفحهٔ ۹۶-۸۱
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱
تاریخ بررسی مجدد: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۳/۱۲

نقش پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید در کاهش سمیت ناشی از کادمیوم در گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.)

مهیار گرامی[1*]، اباذر قربانی[2]، سمیه کریمی[3]
[1] مؤسسهٔ آموزش عالی سنا، ساری، ایران
[2] گروه زیست‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[3] مؤسسهٔ آموزش عالی سنا، ساری، ایران

چکیده

کادمیوم فلز آلایندهٔ محیطی و دارای آثار منفی بر رشد و عملکرد گیاه است. در پژوهش حاضر برای بررسی نقش سالیسیلیک‌اسید بر کاهش سمیت کادمیوم در گیاه مریم‌گلی، تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاهچه‌های مریم‌گلی تیمارشده با غلظت‌های مختلف کادمیوم‌کلرید (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم) و سالیسیلیک‌اسید (صفر، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) ارزیابی شد. نتایج نشان دادند تیمار کادمیوم باعث کاهش رشد، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و افزایش محتوای پرولین، ترکیبات فنولیک، مالون‌دی‌آلدئید و پراکسیدهیدروژن می‌شود؛ باوجوداین، پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث بهبود رشد و افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پرولین، قندهای محلول و ترکیبات فنولیک در تمام سطوح کادمیوم می‌شود. سالیسیلیک‌اسید با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز و پراکسیداز و کاهش مالون‌دی‌آلدئید و پراکسیدهیدروژن باعث کاهش تنش اکسیداتیوی حاصل از سمیت کادمیوم و افزایش تحمل گیاه به تنش کادمیوم می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان دادند پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید ممکن است با بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی و افزایش ترکیبات اسمولیت و متابولیت‌های ثانویه در گیاهان در معرض تنش کادمیوم باعث افزایش تحمل گیاه نسبت به سمیت کادمیوم شود.

واژه‌های کلیدی: سالیسیلیک‌اسید، تنش کادمیوم، مریم‌گلی، آنزیم آنتی‌اکسیدان

* نگارندهٔ مسؤول: نشانی پست الکترونیک: mahyar.gerami@yahoo.com، شمارهٔ تماس: ۰۱۱۴۴۲۲۱۳۸۷

Copyright©2017, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/BY-NC-ND/4.0), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

مقدمه

سالیسیلیک‌اسید تنظیم‌کنندهٔ رشد گیاهی با ماهیت فنلی و دارای نقش مهمی در تنظیم تعدادی از فرایندهای فیزیولوژیک و حفاظت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی است. سالیسیلیک‌اسید با اثر بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و متابولیت‌هایی مانند آسکوربیک‌اسید و گلوتاتیون آثار ناشی از تنش‌های خشکی، گرما، شوری، فلزهای سنگین و بیماری‌های گیاهی را کاهش می‌دهد (Choudhury and Panda, 2004). Kawano و Muto (۲۰۰۰) در مطالعهٔ خود نشان دادند این ترکیب در گیاه تنباکو به افزایش غلظت کلسیم سیتوزولی (مؤثر به‌شکل پیامبر ثانویه در پاسخ‌های فیزیولوژیک) منجر می‌شود. Gharib (۲۰۰۷) نشان داد پرولین آزاد القاشونده توسط سالیسیلیک‌اسید غشاها و پروتئین‌ها را در برابر آثار مضر یون‌های کانی در ریحان و مرزنگوش محافظت می‌کند.

کادمیوم یک فلز آلایندهٔ محیطی است که در محیط منتشر می‌شود و منابع گوناگونی شامل صنایع، فاضلاب شهری و مواد سوختی غلظت این آلاینده را افزایش می‌دهند. اگرچه کادمیوم برای رشد گیاهان ضروری نیست، ریشهٔ گیاهان آن را به‌آسانی جذب می‌کند و این عنصر سبب تنش اکسیداتیو می‌شود. کادمیوم تغییرات ساختاری، بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی بسیاری را القا می‌کند؛ بنابراین به‌شدت بر تولید زیتوده تأثیر می‌گذارد و سرانجام موجب مرگ گیاه می‌شود. غلظت بحرانی کادمیوم در خاک ۳ تا ۸ پی‌پی‌ام گزارش شده است. بررسی آلودگی اراضی زراعی کشور نشان می‌دهد مقدار کادمیوم در بخشی از اراضی آلودهٔ استان‌های گیلان، زنجان، اصفهان و چهارمحال‌وبختیاری به‌ترتیب ۱/۹، ۱۸۰/۵، ۸۹/۴، ۲۶۱۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (Torabian and Mahjori, 2002). Moussa و El-Gamal (۲۰۱۰) گزارش کردند تیمار غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومولار کادمیوم باعث کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی می‌شود و انباشت کادمیوم در ریشه‌های گندم را افزایش می‌دهد.

مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) گیاهی چندساله و علفی است که منشأ آن نواحی شمالی مدیترانه و شمال آفریقا گزارش شده است. این گیاه از راستهٔ لب‌گلی‌ها و تیرهٔ نعناعیان است و توژان (۳۵ تا ۶۰ درصد)، سینئول، بورنئول و بوربورنئول‌استات ترکیبات اصلی اسانس آن را تشکیل می‌دهند (Omid Beigi, 2005). مریم‌گلی به‌شکل چاشنی و طعم‌دهنده در صنایع غذایی و گل‌های آن برای تهیهٔ نوعی دمنوش مانند چای استفاده می‌شود. این گیاه ضداسپاسم، ضدقابض، ضدعفونی‌کننده، آنتی‌بیوتیک، آرام‌بخش، محرک کبد و بهبوددهندهٔ عمل هضم است که این خواص در صنایع دارویی بسیار کاربرد دارند (Eidi *et al.*, 2005). باتوجه‌به اهمیت گیاه مریم‌گلی به‌عنوان گیاهی دارویی و نقش مثبت سالیسیلیک‌اسید در افزایش تحمل گیاهان نسبت به تنش‌ها، در پژوهش حاضر تأثیر غلظت‌های مختلف سالیسیلیک‌اسید در تحمل گیاه نسبت به غلظت‌های مختلف کادمیوم بررسی شد.

مواد روش‌ها

پژوهش حاضر طی سال ۹۶-۱۳۹۵ در گلخانهٔ مؤسسهٔ آموزش عالی سنا به‌شکل فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول چهار سطح کادمیوم (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام) و فاکتور دوم محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید در چهار سطح (صفر، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) بود. بذرهای گیاه مریم‌گلی پس‌از جوانه‌زنی، درگلدان‌های پلاستیکی (قطر ۱۲

سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) با بستر حاوی پیت‌موس و پرلیت کشت شدند؛ سپس به‌مدت چهار هفته در اتاق کشتی با دورهٔ نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی و دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری و با محلول غذایی هوگلند تغذیه شدند.تیمار سالیسیلیک‌اسید با اسپری روی برگ گیاه و در دو مرحله با فاصلهٔ زمانی ۵ روز انجام و تیمار شاهد با آب مقطر اسپری شد. پس‌از مرحلهٔ دوم اسپری سالیسیلیک‌اسید، تیمار غلظت‌های صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم (با اضافه‌کردن کادمیوم‌کلرید به محلول هوگلند) اعمال شد و گلدان‌ها بر حسب نیاز آبیاری شدند. نمونه‌برداری ۳۰ روز پس‌از اعمال تیمار کادمیوم انجام شد و صفت‌های ریخت‌شناسی مانند ارتفاع و طول ریشه گیاه با خط‌کش اندازه‌گیری شدند. سطح برگ هر گیاه با دستگاه Leaf Area Meter اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک ریشه و اندام هوایی، نمونه‌ها به‌مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۵ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس وزن شدند. نمونه‌های دیگر برای اندازه‌گیری شاخص‌های بیوشیمیایی در دمای منفی ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شدند.

اندازه‌گیری کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئید: میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی به روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) محاسبه شد؛ مطابق این روش، ۰/۵ گرم بافت تازهٔ برگ وزن شد و رنگیزه‌ها با استون ۸۰ درصد استخراج شدند. پس‌از صاف‌کردن عصاره با کاغذ صافی، جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده و میزان رنگیزه‌ها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد.

اندازه‌گیری H_2O_2 و MDA: محتوای H_2O_2 برگ طبق روش Velikova و همکاران (۲۰۰۰) تعیین شد؛ به این منظور، ۰/۲ گرم بافت تازهٔ برگی با ۳ میلی‌لیتر تری‌کلرواستیک‌اسید (TCA) ۰/۱ درصد ساییده و به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۱۲۰۰۰ دوردردقیقه سانتریفیوژ شد. ۰/۵ میلی‌لیتر از عصارهٔ رویی به ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات (با اسیدیتهٔ ۷) و ۱ میلی‌لیتر یدیدپتاسیم (KI) ۱ مولار اضافه شد. جذب در طول موج ۳۹۰ نانومتر خوانده و با ضریب خاموشی ۰/۲۸ بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر محاسبه شد.

میزان مالون‌دی‌آلدئید طبق روش Heath و Packer (۱۹۶۸) تعیین شد؛ به‌این‌ترتیب که ۰/۲ گرم بافت تازهٔ برگی در ۳ میلی‌لیتر تری‌کلرواستیک‌اسید (TCA) ۰/۱ درصد عصاره‌گیری شد و سپس ۱ میلی‌لیتر تیوباربی‌توریک‌اسید (TBA) ۰/۵ درصد به ۱ میلی‌لیتر عصارهٔ صاف‌شده اضافه شد و به‌مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفت. پس‌از سردشدن نمونه، جذب در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده و با ضریب خاموشی ۱۵۵ بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر محاسبه شد.

پرولین و قندهای محلول: برای اندازه‌گیری پرولین آزاد و قندهای محلول کل از عصارهٔ الکلی برگ و ریشه استفاده شد. میزان پرولین با خواندن جذب واکنش نین‌هیدرین در طول موج ۵۱۵ نانومتر طبق روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) محاسبه شد. برای محاسبهٔ قندهای محلول، ۰/۱ میلی‌لیتر عصارهٔ الکلی به ۳ میلی‌لیتر آنترون تازه‌آماده‌شده (۲۰۰ میلی‌گرم آنترون به‌اضافهٔ ۱۰۰ میلی‌لیتر سولفوریک‌اسید (w:w)) اضافه و به‌مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم قرار گرفت؛ سپس، میزان جذب نمونه در طول موج ۶۲۵ نانومتر خوانده شد (Irigoyen *et al.*, 1992).

آنتوسیانین کل: برای سنجش میزان آنتوسیانین کل، مقدار ۰/۰۲ گرم بافت خشک برگ با ۴

میلی‌لیتر محلول کلریدریک‌اسید ۱ درصد متانول ساییده و محلول حاصل به‌مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شد؛ سپس، محلول به‌مدت ۱۰ دقیقه در ۱۳۰۰۰ دوردردقیقه سانتریفیوژ و جذب محلول رویی در طول موج‌های ۵۳۰ و ۶۵۷ نانومتر خوانده شد. کلریدریک‌اسید ۱ درصد متانول شاهد در نظر گرفته شد (Mita *et al*., 1997).

فعالیت درصد مهار رادیکال آزاد DPPH: ۲ میلی‌لیتر محلول متانولی ۰/۰۰۴ درصد ۲ و ۲- دی فنیل پیکریل هیدرازیل (DPPH) به عصاره‌های گیاهی اضافه شد. محلول شاهد شامل ۲ میلی‌لیتر DPPH و ۲ میلی‌لیتر متانول بود. محلول‌ها به‌مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی و دمای اتاق انکوبه شدند و سپس، جذب آنها در ۵۱۷ نانومتر در مقایسه با شاهد متانول خوانده شد (Miliauskas *et al*., 2004).

فنل و فلاونوئید کل: فنل کل به روش Folin-Ciocalteu ارزیابی شد (Meyers *et al*., 2003)؛ در این روش، عصارهٔ متانولی استخراج‌شده با ۱۲۵ میکرولیتر معرف فولین ۱۰ درصد مخلوط شد و پس‌از ۵ دقیقه در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد، ۱۰۰ میکرولیتر محلول ۷ درصد بیکربنات‌سدیم به آن اضافه شد. پس‌از ۱۲۰ دقیقه نگهداری در شرایط بدون نور، مقدار جذب محلول در طول موج ۷۶۵ نانومتر خوانده شد. مقدار فنل کل از روی منحنی استاندارد گالیک‌اسید بر حسب میلی‌گرم گالیک‌اسید در گرم بافت تازه بیان شد.

مقدار فلاونوئید کل به روش کالری‌متری آلومینیوم‌کلرید اندازه‌گیری شد (Du *et al*., 2009)؛ ابتدا به ۱۵۰ میکرولیتر عصارهٔ استخراج‌شده به‌ترتیب ۱۷۰۰ میکرولیتر اتانول ۳۰ درصد، ۱۵۰ میکرولیتر نیتریت‌سدیم ۰/۵ میلی‌مولار و ۱۵۰ میکرولیتر آلومینیوم‌کلرید ۰/۳ میلی‌مولار اضافه شد. پس‌از ۱۰ تا ۱۵ دقیقه، میزان جذب در طول موج ۵۰۶ نانومتر خوانده شد. مقدار فلاونوئید کل از روی منحنی استاندارد کاتچین بر حسب میلی‌گرم کاتچین در گرم بافت تر بیان شد.

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و پروتئین محلول: برای تهیهٔ عصارهٔ آنزیمی، مقدار ۰/۵ گرم بافت تازهٔ برگ با ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۱ مولار (با اسیدیتهٔ ۶/۸) هموژن و به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۱۳۰۰۰ دوردردقیقه و دمای ۴ درجهٔ سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. فاز رویی برای اندازه‌گیری فعالیت کاتالاز، پراکسیداز و پروتئین محلول استفاده شد. فعالیت کاتالاز به روش Cakmak و Horest (۱۹۹۱) اندازه‌گیری شد. طبق تعریف، یک واحد کاتالاز مقدار آنزیمی است که موجب تجزیهٔ یک میکرومول H_2O_2 طی مدت یک دقیقه در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد شود؛ بنابراین محلول واکنش حاوی ۰/۵ میلی‌لیتر H_2O_2 ۱۰ میلی‌مولار، ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات‌سدیم ۲۵ میلی‌مولار (با اسیدیتهٔ ۶/۸) و ۱۰۰ میکرولیتر عصارهٔ آنزیمی بود. واکنش با شروع تجزیهٔ H_2O_2 در محیط آغاز شد و میزان کاهش جذب در طول زمان در طول موج ۲۴۰ نانومتر خوانده شد. سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز به روش Hegar و همکاران (۱۹۹۶) انجام شد و معرف لازم برای این سنجش گایاکول بود. ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات‌پتاسیم ۶۰ میلی‌مولار (با اسیدیتهٔ ۶/۱)، ۰/۵ میلی‌لیتر گایاکول ۲۸ میلی‌مولار و ۰/۵ میلی‌لیتر H_2O_2 ۵ میلی‌مولار به ۱۰۰ میکرولیتر عصارهٔ آنزیمی اضافه و جذب محلول در طول موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. برای اندازه‌گیری پروتئین از روش Bradford (۱۹۷۶) استفاده شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر خوانده و منحنی رگرسیون رسم شد.

محاسبه‌های آماری: تجزیهٔ آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS و مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد.

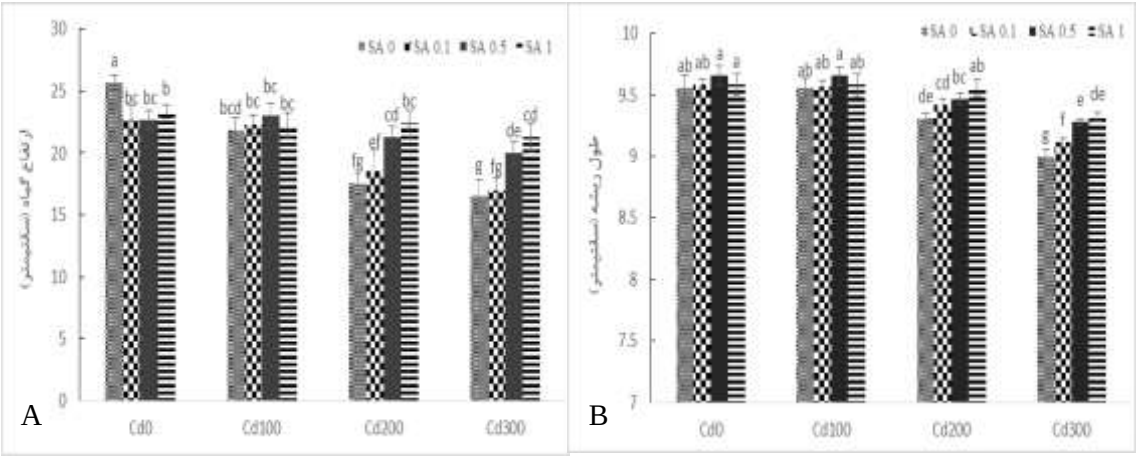
نتایج

صفت‌های ریخت‌شناسی: نتایج تجزیه واریانس صفت‌های ریخت‌شناسی نشان دادند اثر تیمار کادمیوم، سالیسیلیک‌اسید و اثر متقابل تیمارها روی تمام صفت‌های ریخت‌شناسی در سطح ۱ درصد معنادار است (جدول ۱). نتایج مقایسهٔ میانگین نشان دادند ارتفاع گیاه و طول ریشه با افزایش غلظت کادمیوم به‌طور معناداری کاهش می‌یابند؛ به‌طوری که کمترین میزان ارتفاع و طول ریشه در غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم مشاهده می‌شود. اسپری کردن سالیسیلیک‌اسید در تمام سطوح کادمیوم صفت‌های یادشده را به‌طور معناداری افزایش داد؛ به‌طوری که بیشترین میزان ارتفاع و طول ریشه در غلظت ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید ثبت شد (شکل ۱). مقایسهٔ میانگین سه صفت وزن خشک ریشه، اندام هوایی و سطح برگ نشان داد افزایش غلظت کادمیوم با کاهش معنادار تمام صفت‌ها نسبت به تیمار شاهد همراه است؛ هرچند تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث بهبود صفت‌های یادشده در شرایط سمیت کادمیوم می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳).

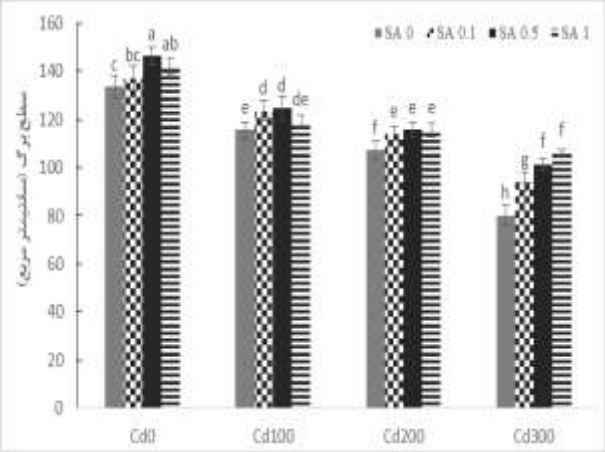
جدول ۱- تجزیه واریانس صفت‌های ریخت‌شناسی در شرایط تنش کادمیوم و سالیسیلیک‌اسید در گیاه مریم‌گلی

	ارتفاع	سطح برگ	وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام هوایی	طول ریشه
کادمیوم	۵۹/۴**	۴۰۴۳**	۰/۰۰۵**	۰/۰۲۴**	۰/۴۷**
سالیسیلیک‌اسید	۱۳/۲**	۴۰۵**	۰/۰۰۰۷**	۰/۰۰۳**	۰/۰۷**
کادمیوم×سالیسیلیک‌اسید	۸/۵**	۵۹**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۴**	۰/۰۱۳**
خطا	۱/۰۷	۱۳/۰۷	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴

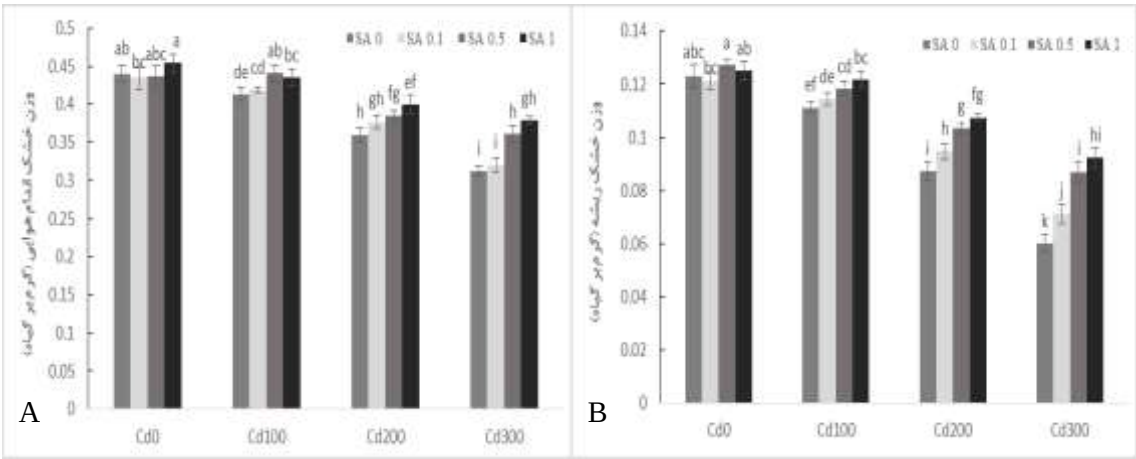
* و ** به‌ترتیب معنادار در سطح ۱ درصد و ۵ درصد هستند.



شکل ۱- مقایسهٔ میانگین ارتفاع (A) و طول ریشه (B) گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد است.



شکل ۲- مقایسهٔ میانگین صفت سطح برگ گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد است.



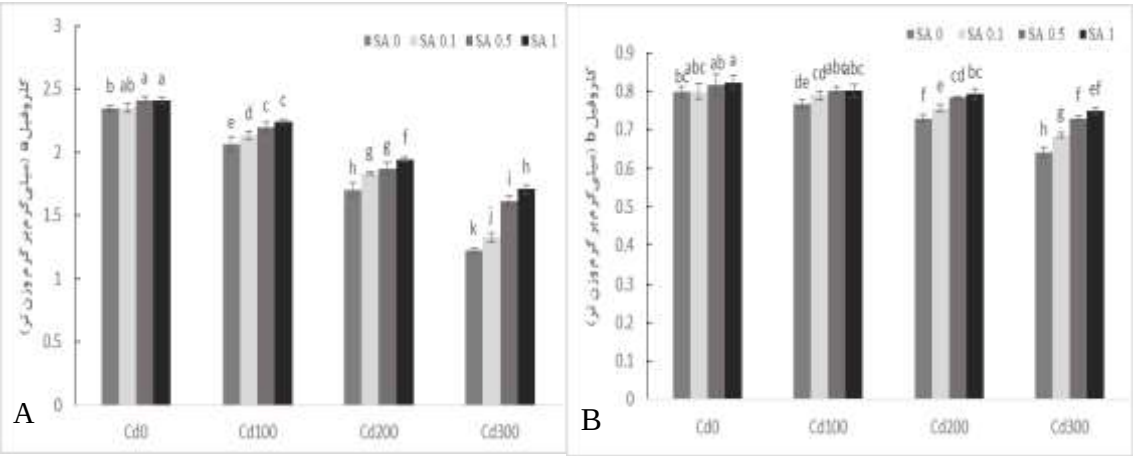
شکل ۳- مقایسهٔ میانگین وزن خشک اندام هوایی (A) و ریشه (B) گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد است.

رنگیزه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین: تجزیه واریانس رنگیزه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین نشان داد تیمار کادمیوم، سالیسیلیک‌اسید و اثر متقابل آنها روی صفت‌های یادشده تأثیر معناداری در سطح ۱ درصد دارد (جدول ۲). مقایسهٔ میانگین صفت‌های یادشده نشان داد کادمیوم باعث کاهش معنادار رنگیزه‌های فتوسنتزی و آنتوسیانین می‌شود و بیشترین کاهش در غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده می‌شود. اسپری برگی سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش معنادار صفت‌های یادشده در تمام غلظت‌های کادمیوم شد؛ به‌طوری‌که تیمار ۱ میلی‌مولار باعث افزایش محتوای کلروفیل‌های a و b، کاروتنوئید و آنتوسیانین به‌ترتیب به میزان ۳۹/۷، ۱۶/۵، ۳۶/۲ و ۴۴/۹ درصد نسبت به تیمار غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم به‌تنهایی شد (شکل‌های ۴ و ۵).

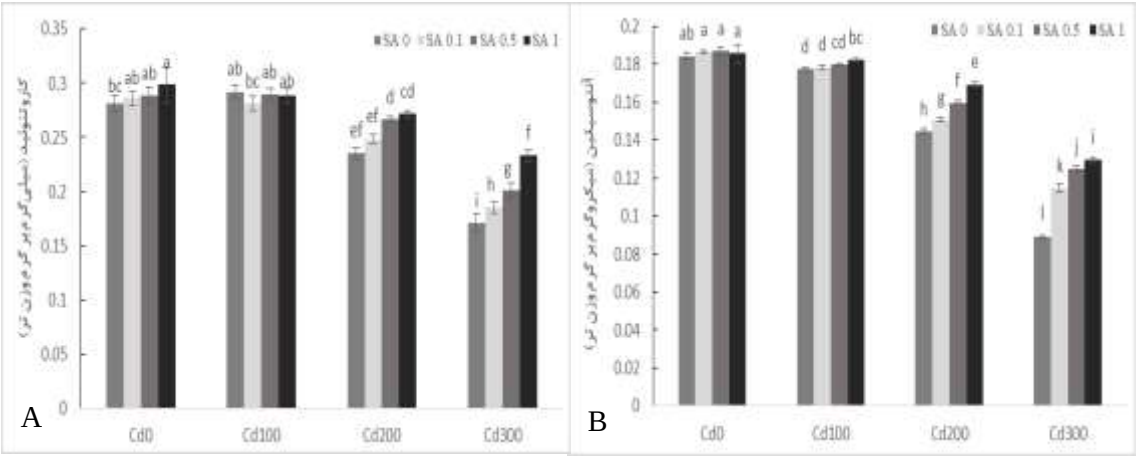
جدول ۲- تجزیه واریانس صفت‌های رنگیزه‌های فتوسنتزی، آنتوسیانین، پرولین، قندهای محلول، فنل و فلاونوئید کل در شرایط تنش کادمیوم و سالیسیلیک‌اسید در گیاه مریم‌گلی

	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	آنتوسیانین	پرولین	قند محلول	فنل کل	فلاونوئید
کادمیوم	۱/۹**	۰/۰۳**	۰/۰۲**	۰/۰۱۲**	۳۱۲**	۵۷**	۲۸۰**	۵۶**
سالیسیلیک‌اسید	۰/۱۴**	۰/۰۰۸**	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۰۷**	۶/۷**	۳/۱**	۳/۳**	۱/۲**
کادمیوم×سالیسیلیک‌اسید	۰/۰۳**	۰/۰۰۰۸**	۰/۰۰۰۵**	۰/۰۰۰۲**	۱/۴**	۰/۲۴**	۱**	۰/۲**
خطا	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۴۸	۰/۰۱۸	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۸

* و ** به‌ترتیب معنادار در سطح ۱ درصد و ۵ درصد هستند.



شکل ۴- مقایسهٔ میانگین محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

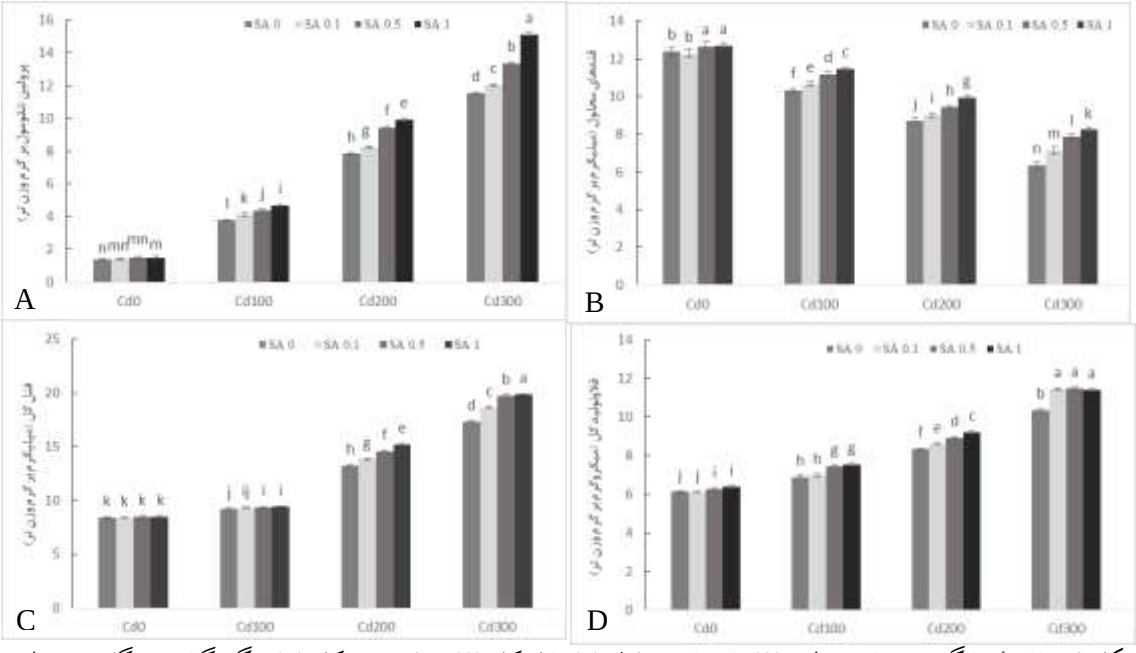


شکل ۵- مقایسهٔ میانگین محتوای کاروتنوئید (A) و آنتوسیانین (B) گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

پرولین و قندهای محلول: تجزیه واریانس نشان داد تیمار کادمیوم، سالیسیلیک‌اسید و اثر متقابل آنها روی محتوای پرولین و قندهای محلول برگ گیاه مریم‌گلی تأثیر معناداری در سطح ۱ درصد دارد (جدول ۲). مقایسهٔ میانگین محتوای پرولین نشان داد تیمار کادمیوم باعث افزایش معنادار پرولین می‌شود و بیشترین افزایش محتوای پرولین در غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده می‌شود. تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش بیشتر پرولین در تمام سطوح کادمیوم شد؛ به‌طوری‌که تیمار ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم به‌ترتیب باعث افزایش ۲۳/۸، ۲۶/۴ و ۳۰/۹ درصد پرولین نسبت به تیمار کادمیوم به‌تنهایی شد (شکل ۶A). مقایسهٔ میانگین قندهای محلول برگ نیز نشان داد تیمار کادمیوم باعث کاهش قندهای محلول می‌شود و میزان کاهش قندهای محلول با افزایش غلظت کادمیوم افزایش می‌یابد. اسپری برگی سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش میزان قندهای محلول در تمام سطوح کادمیوم شد که تأثیر مثبت این ترکیب بر محتوای قندهای محلول برگ را نشان می‌دهد (شکل ۶B).

محتوای فنل و فلاونوئید کل: تجزیه واریانس نشان داد تیمار کادمیوم، سالیسیلیک‌اسید و اثر متقابل آنها روی محتوای فنل و فلاونوئید کل تأثیر معناداری در سطح ۱ درصد دارد (جدول ۲). مقایسهٔ میانگین محتوای فنل و فلاونوئید نشان داد محتوای فنل و فلاونوئید برگ با افزایش غلظت کادمیوم افزایش می‌یابد و بیشترین میزان افزایش محتوای فنل و فلاونوئید در غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم به‌ترتیب با ۱۰۵/۵ و ۶۱/۹ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد (بدون کادمیوم و سالیسیلیک‌اسید) ثبت شد. تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش بیشتر فنل و فلاونوئید کل در تمام سطوح کادمیوم شد و بیشترین افزایش محتوای فنل و فلاونوئید کل به‌ترتیب در غلظت‌های ۱ و ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید با ۱۳۵/۵ و ۸۷/۷ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد (شکل‌های ۶C و ۶D).

محتوای MDA، H_2O_2 و DPPH: تجزیه واریانس صفت‌های MDA، H_2O_2 و DPPH نشان داد اثر تیمارهای کادمیوم، سالیسیلیک‌اسید و اثر متقابل آنها بر صفت‌های یادشده در سطح ۱ درصد معنادار است (جدول ۳). مقایسهٔ میانگین میزان MDA و H_2O_2 نشان داد میزان صفت‌های یادشده با افزایش غلظت کادمیوم به‌طور معناداری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که بیشترین افزایش میزان MDA و H_2O_2 در غلظت ۳۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم به‌ترتیب با ۲۰۶/۲ و ۱۴۵/۵ درصد افزایش اندازه‌گیری شد. تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث کاهش معنادار MDA و H_2O_2 در تمام سطوح کادمیوم شد و بیشترین میزان کاهش در غلظت ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید مشاهده شد (شکل‌های ۷A و ۷B). مقایسهٔ میانگین DPPH نشان داد درصد مهار رادیکال آزاد با افزایش سطوح سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم روند افزایشی نشان می‌دهد و درصد مهار رادیکال آزاد در سطوح مختلف کادمیوم با افزایش غلظت سالیسیلیک‌اسید افزایش می‌یابد (شکل ۸A).

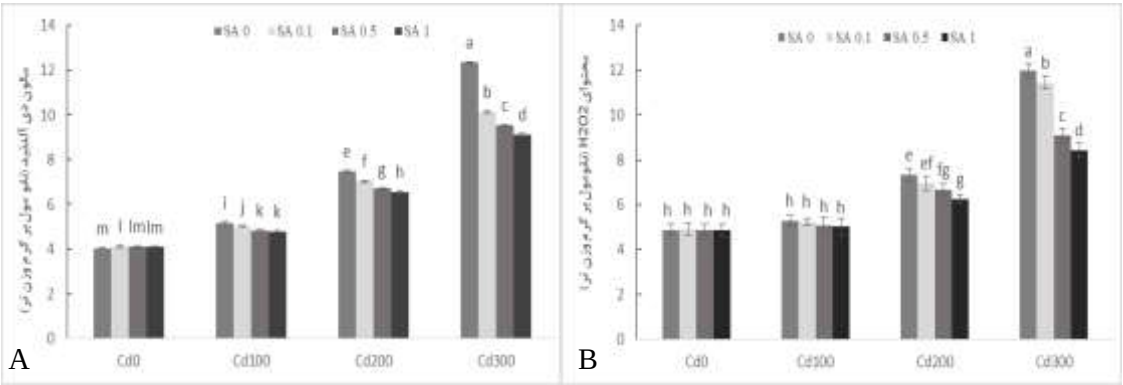


شکل ۶- مقایسهٔ میانگین محتوای پرولین (A)، قندهای محلول (B)، فنل کل (C) و فلاونوئید کل (D) برگ گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سالیسیلیک‌اسید و کادمیوم بر برخی صفت‌های بیوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی گیاه مریم‌گلی

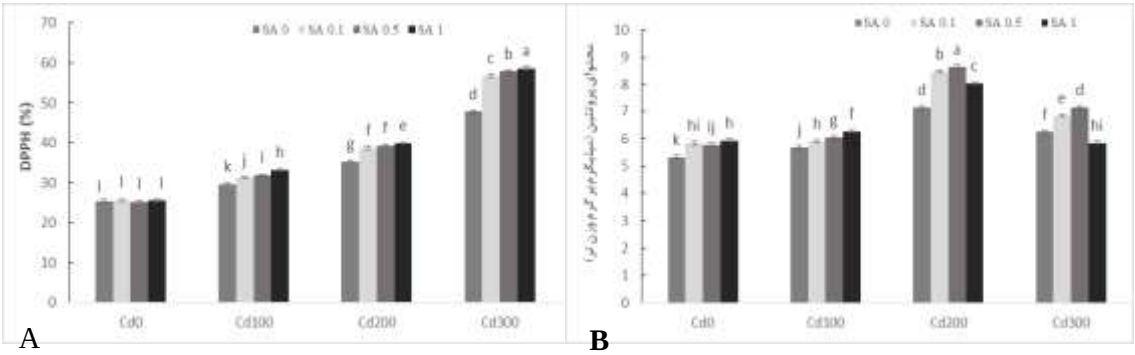
	MDA	H_2O_2	DPHH	پروتئین	کاتالاز	پراکسیداز
کادمیوم	۹۰**	۷۳**	۱۹۸۸**	۱۳/۳**	۱۹۸۸**	۱۳/۳**
سالیسیلیک‌اسید	۲/۹**	۴/۱**	۵۴/۶**	۱/۴۸**	۵۴**	۱/۵**
کادمیوم×سالیسیلیک‌اسید	۱/۳**	۱/۹*	۱۳/۹**	۰/۴۳**	۱۳/۹**	۰/۴**
خطا	۰/۰۰۲۴	۰/۰۸	۰/۱۲۷	۰/۰۰۴۴	۱/۱۷	۰/۵۸

* و ** به‌ترتیب معنادار در سطح ۱ درصد و ۵ درصد هستند.

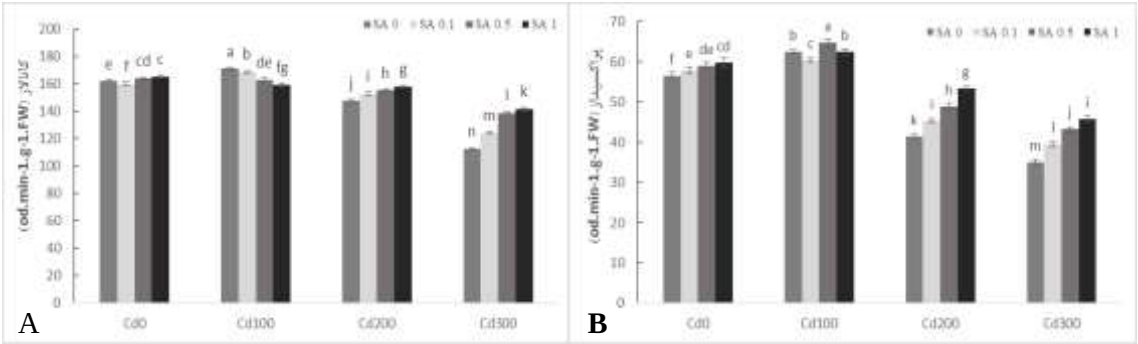


شکل ۷- مقایسه میانگین مالون‌دی‌آلدئید (A) و پراکسیدهیدروژن (B) گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

میزان پروتئین محلول، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز: تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمار کادمیوم، سالیسیلیک‌اسید و اثر متقابل آنها تأثیر معناداری بر میزان پروتئین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در سطح ۱ درصد دارد (جدول ۳). مقایسهٔ میانگین میزان پروتئین محلول برگ گیاه مریم‌گلی نشان داد تیمار کادمیوم باعث افزایش میزان پروتئین محلول نسبت به تیمار شاهد می‌شود و بیشترین میزان افزایش در غلظت ۲۰۰ پی‌پی‌ام مشاهده می‌شود. تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش بیشتر پروتئین‌های محلول در سطوح مختلف کادمیوم شد و این افزایش در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید ثبت شد (شکل ۸B). مقایسهٔ میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز نشان داد تیمار غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم باعث افزایش معنادار فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به شاهد می‌شود اما در غلظت ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام به‌ترتیب با کاهش ۸/۸ و ۳۰/۳ درصدی نسبت به شاهد همراه است. اسپری سالیسیلیک‌اسید در غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم باعث کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز و در سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد. بررسی میانگین فعالیت پراکسیداز نشان داد تیمار غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام کادمیوم باعث افزایش ۱۰/۵ درصدی اما تیمار غلظت‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ پی‌پی‌ام به‌ترتیب باعث کاهش ۲۶/۷ و ۳۸ درصدی نسبت به شاهد می‌شود. تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش معنادار فعالیت پراکسیداز در تمام سطوح کادمیوم شد (شکل ۹).



شکل ۸- مقایسه میانگین DPPH (A) و پروتئین (B) برگ گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.



شکل ۹- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (A) و پراکسیداز (B) گیاه مریم‌گلی در سطوح مختلف کادمیوم (Cd) و سالیسیلیک‌اسید (SA). مقادیر میانگین ۵ تکرار±انحراف معیار هستند. تمام ستون‌ها در هر نمودار باهم مقایسه شده‌اند و حروف متفاوت در هر ستون بیان‌کنندهٔ معناداربودن اثر تیمار بر میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

بحث

در مطالعهٔ حاضر، تأثیر مثبت غلظت‌های مختلف سالیسیلیک‌اسید بر گیاهان مریم‌گلی در شرایط سمیت کادمیوم در شرایط گلخانه‌ای بررسی شد. نتایج نشان دادند تمام صفت‌های ریخت‌شناسی مطالعه‌شده (ارتفاع گیاه، طول ریشه، سطح برگ، وزن خشک ریشه و اندام هوایی) با افزایش غلظت کادمیوم کاهش می‌یابند. ممانعت از رشد همراه با کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی حاصل سمیت کادمیوم است. ممانعت رشد ایجادشده در اثر کادمیوم ناشی از ممانعت تقسیم سلولی و میزان طویل‌شدن سلول‌ها است که عمدتاً به دلیل مهار برگشت‌ناپذیر پمپ‌های پروتون مسئول فرایند رشد سلولی ایجاد می‌شود (Liu *et al*., 2004). تأثیر منفی کادمیوم روی رشد تا اندازه‌ای به‌علت تأثیر عناصر سنگین بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان فتوسنتز است (Metwally *et al*., 2003). سمیت کادمیوم باعث کاهش تثبیت دی‌اکسیدکربن و کارایی فتوسنتزی و افزایش تجزیه و مهار سنتز کلروفیل می‌شود که در نتیجه باعث اختلال در زنجیرهٔ انتقال الکترون و تولید انواع رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود (Moussa, 2004)؛ مشابه با نتایج یادشده، تیمار کادمیوم باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی گیاه جو (Metwally *et al*., 2003) و کاهش وزن خشک گیاه لوبیا به میزان ۳۵ درصد (Rady, 2011) می‌شود. نتایج نشان دادند اسپری برگی سالیسیلیک‌اسید سبب افزایش چشمگیر رشد گیاه قرارگرفته در شرایط تنش کادمیوم و گیاه شاهد (بدون کادمیوم) می‌شود که مطابق نتایج اثر مثبت سالیسیلیک‌اسید بر کاهش آثار منفی سمیت کادمیوم بر رشد جو (Metwally *et al*., 2003) و برنج (Choudhury and Panda, 2004) است. همچنین گزارش شده است پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید با کاهش میزان جذب کادمیوم باعث کاهش سمیت کادمیوم در گیاه می‌شود (Gondor *et al*., 2016).

نتایج نشان دادند در شرایط سمیت کادمیوم، میزان پرولین افزایش و میزان قندهای محلول کاهش می‌یابد و تیمار اسپری سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش دو ترکیب یادشده در تمام سطوح کادمیوم می‌شود. پژوهشگران دیگر نیز افزایش تجمع پرولین را در شرایط تیمار کادمیوم در برنج (Choudhury and Panda, 2004) و گندم (Amani, 2008) گزارش کرده‌اند. در پژوهش حاضر، تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش تجمع پرولین در گیاهان شاهد و گیاهان تیمارشده با کادمیوم شد که با گزارش El-Tayeb و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد؛ آنها گزارش کرده‌اند سالیسیلیک‌اسید باعث تجمع پرولین در بخش‌های مختلف گیاه آفتابگردان در مقایسه با گیاه شاهد می‌شود. ارتباط معکوس بین زیتوده و تجمع پرولین در شرایط سمیت کادمیوم گزارش شده است و نشان می‌دهد این اسمولیت ممکن است تولید شود تا در رشد گیاه مصرف شود (Maggio *et al*., 2002). افزایش میزان قندهای محلول در شرایط تیمار سالیسیلیک‌اسید مطابق نتایج El-Tayeb و همکاران (۲۰۰۶) است؛ آنها نشان داده‌اند سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش تجمع قندهای محلول در ساقه و برگ گیاه تیمارشده با مس می‌شود که تأثیر سالیسیلیک‌اسید روی متابولیسم کربوهیدرات را نشان می‌دهد. همان‌طور که کربوهیدارت‌ها باعث محافظت و ثبات غشاهای

زیستی می‌شوند باعث کاهش تولید مالون‌دی‌آلدئید و بهبود غلظت پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شوند. کاهش میزان پراکسیداسیون غشا و پراکسیداسیون هیدروژن مشاهده‌شده در گیاهان تیمارشده با سالیسیلیک‌اسید ممکن است به‌علت افزایش ظرفیت محافظت گیاه در برابر تنش اکسیداتیو ایجادشده در اثر سمیت کادمیوم باشد. فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی در سیتوپلاسم و سطح سیتوپلاسمی شبکهٔ آندوپلاسمی سنتز می‌شوند و با فعالیت آنتی‌اکسیدانی در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش حفاظتی دارند. اکسیداسیون فلاونوئیدها در شرایط تنش سبب تولید ترکیبات جاروب‌کنندهٔ پراکسیدهیدروژن مانند سمی‌کوئینون و کوئینون‌ها می‌شود (Shakirova *et al*., 2016). نتایج حاضر نشان می دهند تیمار کادمیوم باعث افزایش فنل و فلاونوئید می‌شود و پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش بیشتر این ترکیبات در تمام سطوح سمیت کادمیوم می‌شود؛ این امر نقش مثبت سالیسیلیک‌اسید را در افزایش تحمل گیاه نسبت به سمیت کادمیوم نشان می‌دهد. نتایج یادشده با نتایج Agami و Mohamed (۲۰۱۳) مطابقت دارند.

در مطالعهٔ حاضر، میزان مالون‌دی‌آلدئید، پراکسیدهیدروژن و درصد مهار رادیکال آزاد با افزایش غلظت کادمیوم‌کلرید افزایش یافت. همچنین تیمار سالیسیلیک‌اسید سبب کاهش اکسیداسیون چربی‌های غشای سلولی و کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید و پراکسیدهیدروژن و افزایش درصد مهار رادیکال آزاد در برگ‌ها شد. استفاده از سالیسیلیک‌اسید باعث کاهش معنادار میزان مالون‌دی‌آلدئید شد و بیشترین کاهش در تیمار ۱ میلی‌مولار مشاهده شد. اسیدهای چرب و لیپیدها حساسیت زیادی به اکسیژن دارند و به‌سرعت اکسید می‌شوند و ازآنجاکه غشای سلولی غشایی فسفولیپیدی است، واکنش اکسیژن با آن سبب تخریب غشای سلولی و ترشح الکترولیت‌ها به بیرون سلول می‌شود. سالیسیلیک‌اسید با پاکسازی اکسیژن‌های فعال باعث کاهش اکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی و در نتیجه کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید برگ‌های تیمارشده با سالیسیلیک‌اسید می‌شود. کاهش آسیب غشای سلولی در پاسخ به سالیسیلیک‌اسید نشان‌دهندهٔ القای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی به‌وسیله سالیسیلیک‌اسید با ازبین‌بردن رادیکال‌های آزاد به‌طور مستقیم و یا توسط آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که خسارت ناشی از این گونه‌های فعال را کاهش می‌دهد و این با نتایج Agami و Mohamed (۲۰۱۳) مطابقت دارد.

این موضوع به‌خوبی اثبات شده است که سیستم آنتی‌اکسیدانی نقش مهمی در تحمل گیاه به شرایط تنش‌زا دارد و فعالیت یک یا تعداد بیشتری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان یا ترکیبات غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدان در گیاهان قرارگرفته در شرایط تنش افزایش می‌یابد و باعث افزایش تحمل گیاه به تنش می‌شود (Kadioglu *et al*., 2011). آنزیم سوپراکسیددیسموتاز خط اول دفاعی را در برابر انواع اکسیژن‌های فعال تشکیل می‌دهد و برای خنثی‌سازی O_2^- حیاتی است که همیشه با تولید پراکسیدهیدروژن همراه است. پراکسیدهیدروژن به‌آسانی از غشا عبور می‌کند و سمی است (Foyer

(*et al*., 1997). کاتالاز و پراکسیداز با شکستن پراکسیدهیدروژن و تبدیل آن به آب باعث خنثی‌سازی این ترکیب سمی می‌شوند (Ekmekci *et al*., 2008). در مطالعهٔ حاضر، تیمار کادمیوم (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) باعث کاهش چشمگیر فعالیت دو آنزیم کاتالاز و پراکسیداز نسبت به گیاه شاهد شد؛ درحالی‌که تیمار سالیسیلیک‌اسید باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های یادشده در شرایط سمیت کادمیوم شد که مشابه نتایج Cho و Seo (۲۰۰۵) و Lu و همکاران (۲۰۱۸) است. Guo و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند پیش‌تیمار سالیسیلیک‌اسید با افزایش آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و غلظت گلوتاتیون و تیول‌های غیرپروتئینی که باعث اتصال کادمیوم به گروه تیول آنها می‌شود باعث خنثی‌کردن سمیت کادمیوم در ریشه و برگ گیاه برنج تیمارشده با کادمیوم و افزایش تحمل گیاه قرارگرفته در معرض تنش کادمیوم می‌شود؛ این افزایش در سیستم‌های آنتی‌اکسیدان به کاهش آسیب اکسیداتیو منجر می‌شود که با کاهش H_2O_2 و مالون‌دی‌آلدئید (محصول نهایی پراکسیداسیون لیپید) نشان داده می‌شود. افزایش محتوای پروتئین محلول با تیمار سالیسیلیک‌اسید ممکن است به‌علت افزایش سنتز پروتئین‌هایی باشد که در خنثی‌کردن تنش اکسیداتیوی نقش دارند (Guo *et al*., 2007).

جمع‌بندی

نتایج کلی پژوهش حاضر نشان می‌دهند سالیسیلیک‌اسید سمیت کادمیوم را در گیاه مریم‌گلی قرارگرفته در تنش کادمیوم از طریق بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی و تنظیم متابولیت‌های ثانویه و سیستم آنتی‌اکسیدانی کاهش می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند سالیسیلیک‌اسید تنظیم‌کنندهٔ رشد بالقوه برای بهبود رشد گیاه در شرایط سمیت کادمیوم است. نتایج پژوهش حاضر تا حدی در شناخت نقش سالیسلیک‌اسید در مقاومت گیاه مریم‌گلی به تنش کادمیوم مفید است.

سپاسگزاری

از حمایت‌های علمی و فنی مؤسسهٔ آموزش عالی سنا ساری تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

References

Agami, R. A. and Mohamed G. F. (2013) Exogenous treatment with indole-3-acetic acid and salicylic acid alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings. Ecotoxicology and Environmental Safety 94: 164-171.

Amani, A. F. (2008) Cadmium induced changes in pigment content, ion uptake, proline content and phosphoenolpyruvate carboxylase activity in *Triticum aestivum* seedlings. Australian Journal of Basic and Applied Science 2(1): 57-62.

Bates L. S., Waldren R. P. and Teare I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant Soil 39: 205-207.

Bradford, M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantization of protein utilizing the principle of protein- day binding. Annual Review of Biochemistry 72: 248-254.

Cakmak, I. and Horest, W. J. (1991) Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). Physiologia Plantarum 83(3): 463-468.

Cho, U. H. and Seo, N. H. (2005) Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. Plant Science 168: 113-120.

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.

Du, G., Li, M., Ma, F. and Liang, D. (2009) Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and Vitamin C in Actinidia fruits. Food Chemistry 113: 557-562.

Eidi, M., Eidi, A. and Zamanizadeh, H. (2005) Effect of Salvia officinalis L. leaves on serum glucose and insulin in healthy and streptozotocin-induced diabetic rats. Journal of Ethnopharmacology 100: 310-313.

Ekmekci, Y., Tanyolac, D. and Ayhan, B. (2008) Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. Journal of Plant Physiology 165: 600-611.

El-Tayeb, M., El-Enany, A. and. Ahmed. N. L. (2006) Salicylic acid-induced adaptive response to copper stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Plant Growth Regulation 50: 191-199.

Foyer, C. H., Looez-Delgado, H., Dat, J. F. and Scott, I. M. (1997) Hydrogen peroxide and glutathione-associated mechanisms of acclamatory stress tolerance and signaling. Physiologia Plantarum 100: 241-254.

Gharib, F. A. G. (2007) Effect of salicylic acid on the growth, metabolic activities and oil content of basil and marjoram. International Journal of Agriculture and Biology 4: 485-492

Gondor, O. K., Pál, M., Darkó, É., Janda, T., Szalai, G. (2016) Salicylic acid and sodium salicylate alleviate cadmium toxicity to different extents in maize (*Zea mays* L.). PLOS ONE 11(8): e0160157.

Guo, B., Liang, Y. and Zhue, Y. (2007) Does salicylic acid regulate antioxidant defense system, cell death, cadmium uptake and partitioning to acquire cadmium tolerance in rice? Journal of Plant Physiology 166: 20-31.

Heath, R. L. and Packer L. (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts. Archives of Biochemistry and Biophysics 125(1): 189-198.

Hegar, H., Ueda, N. and Shal, S. V. (1996) Role of reactive oxygen metabolites in DNA damage and cell death in chemical hypoxic injury LLC-PK1 cells. American Journal of Physiology 271: 209-215.

Irigoyen, J. J., Emerich, D. W. and Sanchez-Diaz, M. (1992) Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. Physiologia Plantarum 84: 67-72.

Kadioglu, A., Saruhan, N., Saglam, A., Terzi, R. and Acet, T. (2011) Exogenous salicylic acid alleviates effects of long-term drought stress and delays leaf rolling by inducing antioxidant system. Plant Growth Regulation 64: 27-37.

Kawano, T. and Muto, S. (2000) Mechanism of peroxidase actions for salicylic acid-induced generation of active oxygen species and an increase in cytosolic calcium in tobacco cell suspension culture. Journal of Experimental Botany 51: 685-693.

Lichtenthaler, H. (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods of Enzymology 148: 350-382.

Liu, D., Jiang, W. and Gao, X. (2004) Effects of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tip cells of garlic. Plant Biology 47: 79-83.

Lu, Q., Zhang, T., Zhang, W., Su, C., Yang, Y., Hu, D. and Xu, Q. (2018). Alleviation of cadmium toxicity in *Lemna minor* by exogenous salicylic acid. Ecotoxicology and Environmental Safety 147: 500-508.

Maggio, A., Miyazaki, S., Veronese, P., Fujita, T., Ibeas, J. I., Damsz, B., Narasimhan, M. L., Hasegawa, P. M., Joly, R. J. and Bressan, R. A. (2002)

Does proline accumulation plays an active role in stress-induced growth reduction? Plant Journal 31(6): 699-712.

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.

Meyers, K., Watkins, C., Pritts, M. and Liu, R. H. (2003) Antioxidant and antiproliferative activities of strawberries. Journal of Agricultural and Food Chemistry 51: 6887-6892.

Miliauskas, G., Yenkutonis, P. R. and Vanbeek, T. A. (2004) Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plants extracts. Food Chemistry 85: 231-237.

Mita, S., Murano, N., Akaike, M. and Nakamura, K. (1997) Mutants of *Arabidopsis thaliana* with pleiotropic effects on the expression of the gen for beta-amylase and on the accumulation of anthocyanin that are inducible by sugars. Plant Journal 11: 841-851.

Moussa, H. R. (2004) Effect of cadmium on growth and oxidative metabolism of *faba bean* plants. Acta Agronomy Hungarica 52: 269-276.

Moussa, H. R. and El-Gamal, S. M. (2010) Effect of salicylic acid pretreatment on cadmium toxicity in wheat. Biologia Plantarum 54: 315-320.

Omid Beigi, R. (2005) Production and processing of medicinal plants, Astan Quds Razavi publications. Behnashr, Mashhad (in Persian).

Rady, M. M. (2011) Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. Science Horticulture 129: 232-237.

Shakirova, F. M., Allagulova, Ch. R., Maslennikova, D. R., Klyuchnikova, E. O., Avalbaev, A. M. and Bezrukova, M. V. (2016) Salicylic acid-induced protection against cadmium toxicity in wheat plants. Environmental and Experimental Botany 122: 19-28

Torabian, A. S., and Mahjori, M. (2002) Investigation of the effect of irrigation by sewage on heavy metal adsorption by southern Tehran vegetation. Soil and Water Science 16(2): 39-52. (in Persian).

Velikova, V., Yordanov, I. and Edreva, A. (2000) Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. Plant Science 151(1): 59-66.