مقاله پژوهشی، صفحات ۸۱-۶۵

اثر بیوچار و اسید سالیسیلیک بر رشد و صفات فیزیولوژیکی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) در شرایط آلودگی خاک به کادمیوم

سجاد دیندارلو اینالو و مهدی مدن دوست*

ایران، فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فسا، گروه زراعت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

چکیده

فلزات سنگین از مهم‌ترین آلاینده‌ها در محیط زیست به شمار می‌روند و استفاده از بیوچار و اسید سالیسیلیک می‌تواند نقش بسزایی در تحمل گیاهان به فلزات سنگین داشته باشد. این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در شهر شیراز انجام گردید. عوامل آزمایشی شامل نیترات کادمیوم در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم در کیلوگرم خاک) و ترکیبات اصلاح کننده در پنج سطح شامل شاهد، بیوچار در دو سطح ۲ و ۴ درصد وزنی و اسید سالیسیلک در دو سطح ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار بود. نتایج نشان داد که بیشترین غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی، نشت یونی و مالون‌دی‌آلدهید در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم مشاهده شد. از سوی دیگر در ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی به ترتیب سبب کاهش ۳۵ و ۳۱ درصدی غلظت کادمیوم ریشه نسبت به شاهد شد. همچنین در تیمار نیترات کادمیوم ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، کاهش ۱۴ و ۱۶ درصدی مالون‌دی‌آلدهید برگ با اسید سالسیسیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار مشاهده شد. آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز برگ با افزایش مصرف نیترات کادمیوم روند افزایشی نشان داد. در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی توانست سبب افزایش ۲۱ و ۲۵ درصدی وزن دانه نسبت به شاهد شود. در مجموع نتایج این پژوهش اثرات موفق ترکیبات بیوچار و اسید سالیسیلیک را در بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی، وزن اندام هوایی و دانه را نشان داد.

واژه های کلیدی: اسید سالیسیلیک، بیوچار، زیره سبز، کادمیوم

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mehdimadandoust@yahoo.com

مقدمه

گیاه دارویی زیره سبز با نام علمی *Cuminum cyminum L* از خانواده چتریان (Apiaceae) و به صورت یک‌ساله مورد کاشت قرار می‌گیرد. زیره سبز از مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین گیاهان دارویی است که می‌تواند در شرایط کمبود آب و با حاصلخیزی کم خاک در مناطق خشک و نیمه خشک جهان کاشته شود. به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه بیشتری به کاشت زیره سبز شده است و سطح زیر کشت آن افزایش پیدا کرده است [37]. گیاهان دارویی به دلیل نیاز کم به عناصر غذایی برای شروع حرکت از کشاورزی متداول به سمت کشاورزی پایدار (دوره گذار یا انتقالی) بسیار مناسب‌اند. از سوی دیگر با توجه به مشکلات زیست محیطی ناشی از آلودگی خاک‌های کشاورزی، استفاده از ترکیبات آلی می‌تواند به عنوان راهکاری در افزایش عملکرد گیاهان دارویی باشد [12]. بنابراین معرفی روش‌های مناسب تولید جهت افزایش کمیت و کیفیت گیاهان دارویی بالاخص گیاه دارویی زیره سبز حائز اهمیت می‌باشد [35].

امروزه با توجه به دخالت‌های انسان از طریق فعالیت‌های صنعتی، شهری و حمل و نقل سبب تجمع فزاینده در غلظت‌های بالایی از فلزات در منابع طبیعی و زمین‌های کشاورزی شده است [43]. گزارش شده است که عنصر کادمیوم حتی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک حالت سمیت و بازدارندگی روی رشد گیاهان داشته و باعث کاهش فعالیت میکروبی و حاصلخیزی خاک می‌شود. از سوی دیگر افزودن مواد آلی در خاک می‌تواند میزان کادمیوم را تا حدودی به صورت غیر قابل جذب درآورد و از اثرات بازدارندگی آن روی گیاهان کاسته شود [20]. با توجه به اینکه عنصر کادمیوم میل ترکیبی کمی برای اتصال به فازهای تثبیت‌کنندهی خاک نظیر اکسیدها و کلات‌ها دارد، بنابراین قابلیت جذب این عنصر توسط ریشه گیاهان زیاد است [29]. جذب بیش از اندازه کادمیوم توسط ریشه گیاه سبب انتقال و تجمع در اندام‌های هوایی گیاهان شده که منجر به ایجاد صدمات متابولیسمی و کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود [44]. به نظر می‌رسد اطلاعات در مورد فرآیندهای مؤثر در نحوه رفع آلودگی فلزات سنگین تا حدودی ناشناخته باقی مانده است و سازوکارهای زیستی رفع آلودگی در گیاهان هنوز به طور کامل مورد شناسایی قرار نگرفته‌اند. در هر حال با توجه به گزارش‌های اخیر محققان، بکارگیری ترکیبات اصلاحی آلی در خاک می‌تواند سبب تغییر در حلالیت فلزات سنگین، میزان جذب و تجمع آنها در گیاهان شود [14].

کودهای با منشا طبیعی به دلیل افزایش مقدار ماده آلی خاک، با فلزات سنگین پیوند یافته و قادر است برای مدت زمان طولانی آلاینده‌ها را در خود نگهداری کند. مواد آلی می‌تواند سطوح زیادی از فلزات محلول را از خاک حذف کرده و سمیت آن‌ها را کاهش دهد [46]. روش‌های نوین کاهش اثرات فلزات سنگین بر رشد گیاهان، کاربرد ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک مانند بیوچار است. در سالیان اخیر استفاده از بیوچار برای اصلاح کیفیت خاک مورد توجه قرار گرفته است که فراهمی زیستی آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد [23]. افزایش حاصلخیزی و تحریک فعالیت ریزجانداران مفید خاکزی توسط بیوچار گزارش شده است [40].همچنین شبه هورمون اسید سالیسیلیک، یکی از مشتقات فنلی است که با ایجاد یک سری واکنش‌های متابولیک در گیاهان، موجب افزایش سازگاری آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی و از جمله افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش فلزات سنگین می‌گردد [39]. استفاده از غلظت‌های بهینه اسید سالسیلیک با تغییر در سطوح فعالیت‌های متابولیت‌های متعدد از جمله آنزیم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی، اسمولیت‌ها، متابولیت‌های ثانویه و ترکیبات کلات‌کننده فلز سنگین، تحمل گیاهان را به تنش فلزات سنگین افزایش می‌دهد [35]. محققان اثرات متقابل نیترات سرب، سالیسیلیک اسید و بیوچار بر ویژگی‌های رشدی گیاه آویشن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تنش فلز سنگین سرب تمام ویژگی‌های رشدی گیاه را کاهش داده، اما تیمارهای اسید سالیسیلیک و بیوچار موجب تعدیل اثرات منفی سرب بر این خصوصیات گردید [41]. گزارش شده است که کاربرد بیوچار و اسید سالیسیلیک می‌تواند با افزایش اسمولیت‌های سازگار باعث تنظیم پتانسیل آب سلول برای مقابله با غلظت زیاد یون‌های تجمع یافته در واکوئل شود و آثار منفی سرب بر گیاه مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) را کاهش دهد [4]. همچنین گزارش شده است که تنش کادمیوم با القای تنش اکسیداتیو موجب تخریب غشای سلولی گیاه خردل سیاه (*Brassica nigra* L.) شده، اما کاربرد برخی شبه هورمون‌ها مثل اسید سالیسیلیک، اثرات تنش اکسیداتیو را کاهش داده و به افزایش پایداری غشا منجر می‌گردد [1].

اگرچه کاربرد بیوچار و اسید سالسیلیک یک استراتژی عملی و امیدوارکننده برای بهبود عملکرد گیاهان در زمین‌های کشاورزی متاثر از آلودگی فلزات سنگین به نظر می‌رسد، اما گزارش‌های مربوط به استفاده از این استراتژی هنوز محدود است. بنابراین با توجه به این حقیقت که استفاده از غلظت‌های مناسب اسید سالیسیلیک و بیوچار در

مقاله پژوهشی، صفحات ۸۱-۶۵

شرایط تنش فلزات سنگین می‌تواند سبب بهبود رشد و بر کمیت و کیفیت گیاهان موثر باشد، بنابراین این پژوهش روی گیاه دارویی زیره سبز انجام شد.

مواد و روشها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملا تصادفی در سه تکرار در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به صورت گلدانی در محیط شبه مزرعه‌ای (خارج از گلخانه) در شهر شیراز با عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی و ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریا انجام گردید. تیمارها شامل عامل نیترات کادمیوم در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم در کیلوگرم خاک) و عامل ترکیبات اصلاح کننده در پنج سطح شامل شاهد (بدون ترکیبات اصلاح کننده)، بیوچار در دو سطح ۲ و ۴ درصد وزنی و اسید سالیسیلک در دو سطح ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار بود. نیترات کادمیوم و اسید سالیسیلیک از ساخت شرکت مرک آلمان استفاده شد. همچنین از بیوچار کلزا از شرکت بیوچار کوهبنان تهیه شد.

اجرای آزمایش: ابتدا گلدان‌ها با خاک مزرعه پر شدند. گلدان‌های استفاده شده از جنس پلاستیک، با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر، با وزن حدود ۶ کیلوگرم خاک بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش به شرح جدول یک می‌باشد. سپس ترکیب آلی بیوچار کلزا با نسبت مشخص شده به طور دستی با خاک هر گلدان مخلوط شدند [10]. در مرحله بعد در تیمار آلوده به فلز سنگین کادمیوم به میزان ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم توسط افشانه اضافه شد [31]. بعد از گذشت مدت زمان یک ماه جهت یکنواخت شدن فلز سنگین در خاک، کاشت بذرهای زیره سبز صورت گرفت [2, 3]. بذرهای زیره سبز که از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شده بود با هیپوکلریت سدیم ۱٪ به مدت ۱۵ دقیقه ضد عفونی و بعد چندین بار با آب مقطر استریل شستشو شد. در هر گلدان ده عدد بذر زیره سبز کاشته شد و پس از سبز شدن گیاهچه‌ها به چهار بوته تنک گردید [5]. لازم به ذکر است که قبل از کاشت بذرها، ۰/۳ گرم کود فسفات آمونیوم (معادل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) با خاک سطحی مخلوط شد و ۰/۵ گرم کود اوره (معادل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) همراه با اولین آب آبیاری و ۰/۵ گرم دیگر کود اوره (معادل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) در مرحله شروع گلدهی همراه با آب آبیاری اضافه شد.

آبیاری گلدان‌ها تا ظرفیت زراعی خاک گلدان انجام شد. جهت محاسبه درصد وزنی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی، ابتدا چهار عدد گلدان به صورت تصادفی انتخاب شد و به حد اشباع از آب رسانیده شدند. جهت جلوگیری از تبخیر آب گلدان‌ها، سطح بالایی گلدان‌ها را به وسیله فویل آلومینیومی پوشانیده شد. گلدان‌ها را به روی سطوح مشبک جهت خروج آب اضافی یا ثقلی قرار داده شدند.

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

کربن آلی (%)	N (%)	P	K	Mn	Zn	Fe	Cu	اسیدیته	هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	بافت
		($mg.kg^{-1}$)								
۰/۵۱	۰/۱	۶/۰	۱۸۶	۳/۲	۱/۷	۸/۵	۰/۶۲	۷/۳۵	۱/۱۱	لوم

پس از گذشت ۴۸ ساعت، گلدان‌ها دوباره وزن شدند و در ادامه گلدان‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت کاملا خشک شده و وزن خشک اندازه‌گیری شدند. بدین ترتیب میانگین اعداد به دست آمده، طبق معادله ۱ معادل ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد.

$$FC = \frac{FCW - DW}{DW} \times 100 \qquad \text{معادله ۱}$$

FCW وزن خاک در ظرفیت زراعی، DW وزن خاک خشک شده در آون است.

در مرحله ۸-۶ برگی، تیمار اسید سالیسیلیک روی برگ گیاهان محلول‌پاشی شد. برای جلوگیری از تبخیر، محلول‌پاشی در هنگام غروب آفتاب و تا تر شدن کامل سطح برگ‌های گیاهان انجام گرفت. محلول‌پاشی در سه مرحله با فاصله هر ده روز یک بار صورت گرفت. در هر مرحله محلول‌پاشی، چند قطره مایع توین (Tween) به عنوان سورفاکتانت یا افزایش قابلیت پخش مایعات استفاده گردید تا جذب سطحی برگ‌ها افزایش پیدا کند. همچنین تیمار شاهد با آب مقطر محلول‌پاشی شد [7].

اندازه‌گیری صفات

غلظت کادمیوم ریشه و برگ: در مرحله گلدهی، غلظت فلز کادمیوم ریشه و اندام هوایی با دستگاه جذب اتمی تعیین شد [36].

صفات فیزیولوژیک: اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در مرحله گلدهی از برگ‌های بالغ و کاملاً توسعه یافته انجام گرفت. برای سنجش میزان نشت یونی برگ‌ها به اندازه یکسان از هر تیمار تهیه شد و هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید [2]. میزان مالون‌دی‌آلدهید با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 ساخت کشور آمریکا، با جذب در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر و با استفاده از ضریب خاموشی (۱۵۵ $\mu M^{-1}. cm^{-1}$) محاسبه شد [30]. برای اندازه گیری محتوای نسبی آب برگ‌ها، قطعاتی تقریباً به اندازه یکسان از برگ جدا و وزن تر آن‌ها با ترازو (دقت ۰/۰۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری گردید. همچنین برای تعیین وزن آماس، قطعات جدا شده برگ‌ها در ظروف پتری سربسته و حاوی آب مقطر در تاریکی با دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفتند. پس از آن رطوبت سطحی برگ‌ها با کاغذ واتمن شماره یک گرفته می‌شود و وزن آماس محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک برگ‌ها، به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند. در نهایت محتوای نسبی آب برگ‌ها با استفاده از معادله ۲ محاسبه گردید [49].

محتوای نسبی آب برگ = ((FW - DW) / (TW - DW)) × ۱۰۰ (معادله ۲)

در این معادله FW وزن تازه‌ی بافت برگ، DW وزن خشک بافت برگ، TW وزن آماس یافته بافت برگ است.

میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و عصاره‌گیری با استون اندازه‌گیری شد [11]. در نهایت جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Vis 2100 ساخت کشور آمریکا در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر و میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل با استفاده از معادله‌های ۳ تا ۵ محاسبه شد.

$$\text{Chlorophyll a} = (mgg^{-1}) = (12.7\times OD.663) - (2.69\times OD.645)\times V/1000\times W \qquad \text{(معادله ۳)}$$

$$\text{Chlorophyll b} = (mgg^{-1}) = (22.9\times OD.645) - (4.68OD.663)\times V/1000\times W \qquad \text{(معادله ۴)}$$

$$\text{Total chlorophyll} = (mgg^{-1}) = (8.02\times OD.663) + (20.2\times OD645)\times V/1000\times W \qquad \text{(معادله ۵)}$$

که در آن V حجم نمونه، OD میزان جذب، W وزن تر نمونه است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای صفات کادمیوم ریشه و اندام هوایی، نشت یونی، مالوندی‌آلدهید و محتوای نسبی آب برگ

منابع تغییرات	درجه آزادی	کادمیوم ریشه	کادمیوم اندام هوایی	نشت یونی	مالوندی‌آلدهید	محتوای نسبی آب برگ
نیترات کادمیوم	۲	۶/۳۱ **	۲۵/۶۲ **	۵۰۶۳/۲ **	۴۹/۷۹ **	۲۵۰۷/۷ **
اصلاح کننده	۴	۰/۰۷۴ **	۰/۱۱۷ **	۱۶۸/۵ **	۲/۰۳ **	۱۱۰/۰ **
نیترات کادمیوم × اصلاح کننده	۸	۰/۰۲۷ **	۰/۰۲۹ *	۴۵/۷ *	۰/۵۵ **	۳۶/۳ *
خطا	۳۰	۰/۰۰۵	۰/۰۱۳	۲۲/۶	۰/۲۶	۲۱/۷۱
ضریب تغییرات (درصد)	_	۱۲/۱	۸/۴	۱۱/۴	۵/۵	۷/۳

*، ** به ترتیب نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵ ، ۰/۰۱ و ns عدم تفاوت معنی‌دار.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای محتوای کلروفیل a، b و a+b، آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل a+b	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	وزن خشک اندام هوایی	وزن دانه
نیترات کادمیوم	۲	۱/۵۷ **	۰/۲۲۶ **	۲/۹۹ **	۰/۳۲۷ **	۰/۷۸۸ **	۳۸۰۳۴ **	۰/۰۱۹ **
اصلاح کننده	۴	۰/۱۲۷ **	۰/۰۳۶ **	۰/۲۹۶ **	۰/۰۰۷ **	۰/۰۲۸ **	۴۰۰۱ **	۰/۰۰۱ **
نیترات کادمیوم × اصلاح کننده	۸	۰/۲۲ **	۰/۰۰۵ *	۰/۰۲۵ *	۰/۰۰۴ **	۰/۰۰۹ **	۸۵۵ *	۰/۰۰۱ **
خطا	۳۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۵۴۵	۰/۰۰۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	_	۱۳/۸	۷/۰	۵/۲	۹/۵	۱۱/۵	۱۵/۲	۱۲/۸

*، ** به ترتیب نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۰/۰۵ ، ۰/۰۱ و ns عدم تفاوت معنی دار.

برای تهیه عصاره آنزیمی میزان ۱۰۰ میلی‌گرم نمونه توزین و به همراه یک میلی لیتر بافر استخراج شامل فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی مولار با اسیدیته ۷/۸ و EDTA ۰/۱ میلی‌مولار در هاون چینی سرد و بر روی یخ همگن گردید. سپس عصاره‌های حاصل در ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوز شدند و محلول رویی حاصل در ظرف‌های استریل جمع‌آوری گردید. محلول رویی به‌دست آمده به عنوان عصاره آنزیمی جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری پروتئین از روش برادفورد استفاده شد [16]. فعالیت آنزیم کاتالاز در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد و به ازای هر میکروگرم پروتئین در عصاره آنزیمی بیان گردید [17]. همچنین سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر در دقیقه به ازای هر میکروگرم پروتئین در میلی‌گرم وزن تر برگ صورت گرفت [24].

جدول ۳- مقایسه میانگین (± خطای استاندارد) برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده روی غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی، نشت یونی، مالون‌دی‌آلدهید و محتوای نسبی آب برگ در زیره سبز

نیترات کادمیوم	ترکیبات اصلاح کننده	کادمیوم ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم)	کادمیوم اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم)	نشت یونی (درصد)	مالون‌دی‌آلدهید (میکرومول بر گرم وزن تازه برگ)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)
شاهد (صفر)	بدون ترکیبات	۰/۰۲۷±۰/۰۰۱ a	۰/۰۲۹±۰/۰۰۲ a	۴۰/۴۶±۱/۳۸ a	۷/۷۷±۰/۰۸۳ a	۷۵/۳۴±۱/۱۸ a
	بیوچار ۲ درصد وزنی	۰/۰۲۳±۰/۰۰۱ a	۰/۰۲۴±۰/۰۰۱ ab	۳۷/۴۶±۱/۵۲ a	۷/۷۲±۰/۰۸۹ a	۷۷/۷۵±۰/۵۱۰ a
	بیوچار ۴ درصد وزنی	۰/۰۱۷±۰/۰۰۱ ab	۰/۰۱۹±۰/۰۰۱ a	۳۳/۸۶±۱/۶۳ a	۷/۶۱±۰/۱۲۲ a	۷۸/۸۸±۰/۱۳۶ a
	اسید سالسیلیک ۱۰۰ میکرومولار	۰/۰۲۵±۰/۰۰۱ a	۰/۰۲۷±۰/۰۰۱ ab	۳۷/۹۳±۱/۱۷ a	۷/۶۸±۰/۰۹۸ a	۷۵/۶۹±۰/۰۷۳ a
	اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار	۰/۰۲۲±۰/۰۰۱ ab	۰/۰۲۳±۰/۰۰۱ ab	۳۶/۷۳±۰/۹۷ a	۷/۶۷±۰/۱۰۲ a	۷۶/۳۲±۰/۹۲۰ a
۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک	بدون ترکیبات	۰/۶۵۷±۰/۰۰۶ a	۱/۶۰±۰/۰۰۹ a	۶۱/۶۳±۱/۸۴ a	۹/۹۳±۰/۰۴۵ a	۶۰/۰۲±۰/۳۵۷ b
	بیوچار ۲ درصد وزنی	۰/۵۵۲±۰/۰۰۳ b	۱/۴۳±۰/۰۲۷ b	۵۵/۴۶±۱/۴۷ ab	۹/۴۱±۰/۱۱۳ ab	۶۴/۸۱±۱/۱۶۳ ab
	بیوچار ۴ درصد وزنی	۰/۴۲۵±۰/۰۰۹ c	۱/۱۵±۰/۰۱۴ c	۴۷/۰۰±۱/۶۲ b	۹/۰۳±۰/۱۲۳ ab	۶۸/۳۲±۰/۲۶۵ a
	اسید سالسیلیک ۱۰۰ میکرومولار	۰/۵۷۹±۰/۰۰۷ b	۱/۵۴±۰/۰۰۸ a	۵۷/۲۰±۱/۴۳ ab	۸/۵۵±۰/۲۴۱ b	۶۲/۱۰±۰/۷۰۹ ab
	اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار	۰/۵۶۲±۰/۰۰۷ b	۱/۴۲±۰/۰۰۶ b	۵۴/۴۲±۱/۰۳ ab	۸/۴۵±۰/۲۶۴ b	۶۳/۰۳±۰/۷۲۸ ab
۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک	بدون ترکیبات	۱/۵۸±۰/۰۱۰ a	۲/۸۶±۰/۰۲۸ a	۸۰/۷۳±۰/۶۶ a	۱۲/۳۳±۰/۰۴۸ a	۴۴/۳۱±۱/۴۴۵ b
	بیوچار ۲ درصد وزنی	۱/۲۵±۰/۰۴۰ bc	۲/۶۰±۰/۰۱۸ ab	۷۴/۷۳±۱/۱۴ ab	۱۱/۷۴±۰/۱۲۲ a	۵۴/۱۱±۱/۵۱۴ ab
	بیوچار ۴ درصد وزنی	۱/۰۹±۰/۰۳۷ c	۲/۳۹±۰/۰۱۴ b	۶۶/۱۳±۰/۵۷ c	۱۱/۴۱±۰/۱۰۸ ab	۵۹/۴۶±۲/۶۶۷ a
	اسید سالسیلیک ۱۰۰ میکرومولار	۱/۴۲±۰/۰۳۲ ab	۲/۶۹±۰/۰۱۸ ab	۷۵/۷۶±۱/۰۹ ab	۱۰/۶۵±۰/۱۸۱ bc	۴۷/۸۵±۱/۵۷۸ ab
	اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار	۱/۲۲±۰/۰۴۶ bc	۲/۶۱±۰/۱۱۰ ab	۷۲/۸۳±۱/۱۳ b	۱۰/۴۱±۰/۱۵۶ c	۴۸/۸۵±۱/۵۳۱ ab

بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن، حروف مختلف هر ستون نمایانگر تفاوت معنی‌دار هستند.

وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه: جهت اندازه‌گیری وزن خشک، پس از شست‌و شو با آب مقطر و خشک شدن در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شدند. همچنین در پایان دوره رشد میزان بذر تولیدی در هر بوته وزن گردید.

آنالیز آماری: تجزیه واریانس داده‌ها برای صفات مختلف با نرم افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ صورت گرفت. مقایسه میانگین نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثر برهمکنش، برش‌دهی انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از رویه L.S.Means انجام گرفت.

نتایج

غلظت کادمیوم ریشه و برگ: نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده، غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی زیره سبز را تحت تاثیر قرار داد، همچنین غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی تحت تأثیر برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت (جدول ۲). در شاهد (بدون کادمیوم) اختلاف معنی‌داری بین ترکیبات اصلاح کننده وجود نداشت (جدول ۳). در ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی به ترتیب سبب کاهش ۳۵ و ۳۱ درصدی غلظت کادمیوم ریشه نسبت به شاهد شد. همچنین غلظت کادمیوم ریشه در بیوچار ۲ درصد وزنی و اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). نتایج دیگر نشان می‌دهد که با افزایش مصرف کادمیوم غلظت کادمیوم ریشه روند افزایشی نشان داد، به‌طوری که بیشترین غلظت کادمیوم ریشه در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد.

غلظت کادمیوم اندام هوایی در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نسبت به شاهد و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). از سوی دیگر در ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، کمترین غلظت کادمیوم اندام هوایی به ترتیب با میزان ۰/۴۲۵ و ۱/۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در بیوچار ۴ درصد وزنی بدست آمد. پس از این تیمار، کاهش معنی‌دار غلظت کادمیوم اندام هوایی در تیمار بیوچار ۲ درصد وزنی و اسید سالسیلیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار مشاهده شد که نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری داشتند. همچنین در شاهد اختلاف معنی‌داری بین ترکیبات کودی مشاهده نشد (جدول ۳).

نشت یونی و مالون‌دی‌آلدهید: نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده، نشت یونی و مالون‌دی‌آلدهید زیره سبز را تحت تاثیر قرار داد، همچنین نشت یونی و مالون‌دی‌آلدهید تحت تأثیر برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت (جدول ۲). افزایش نیترات کادمیوم سبب افزایش نشت یونی برگ زیره سبز شد (جدول ۳). در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده مشاهده نگردید، اما با افزایش مصرف نیترات کادمیوم در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، بیوچار ۴ درصد وزنی توانست سبب کاهش نشت یونی برگ شود. همچنین در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی و پس از آن اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار، سبب کاهش نشت یونی برگ زیره سبز نسبت به شاهد گردید (جدول ۳).

مالون‌دی‌آلدهید برگ زیره سبز با افزایش مصرف نیترات کادمیوم روند افزایشی را نشان داد (جدول ۳). در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده مشاهده نگردید. اما با افزایش مصرف نیترات کادمیوم در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، اسید سالسیسیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار توانست سبب کاهش ۱۴ و ۱۵ درصدی مالون‌دی‌آلدهید برگ نسبت به شاهد شود. همچنین در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، اسید سالسیسیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار، سبب

کاهش ۱۴ و ۱۶ درصدی مالون‌دی‌آلدهید برگ زیره سبز نسبت به شاهد گردید (جدول ۳).

محتوای نسبی آب برگ: نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده، محتوای نسبی آب برگ زیره سبز را تحت تاثیر قرار داد، همچنین محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت (جدول ۲). افزایش نیترات کادمیوم سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ زیره سبز شد (جدول ۳). همچنین در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده مشاهده نگردید. اما با افزایش مصرف نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک توانست سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ شود (جدول ۳).

مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی: محتوای کلروفیل a، b و a+b برگ زیره سبز تحت تاثیر نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت، همچنین محتوای کلروفیل a، b و a+b برگ زیره سبز تحت تاثیر نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت (جدول ۴). افزایش نیترات کادمیوم سبب کاهش محتوای کلروفیل a برگ زیره سبز شد (جدول ۵). در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده مشاهده نگردید. در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیشترین محتوای کلروفیل a برگ به میزان ۲/۵۴ و ۲/۶۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در بیوچار ۲ و ۴ درصد وزنی مشاهده شد. همچنین در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیوچار ۲ و ۴ درصد وزنی و پس از آن اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار توانست سبب افزایش محتوای کلروفیل a برگ شود (جدول ۵).

در شاهد بیوچار ۴ درصد وزنی سبب افزایش محتوای کلروفیل b گردید (جدول ۵). در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیشترین محتوای کلروفیل b برگ به میزان ۰/۹۶ و ۱/۰۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در بیوچار ۲ و ۴ درصد وزنی مشاهده شد. در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده وجود نداشت (جدول ۵).

در شاهد (بدون نیترات کادمیوم)، بیوچار ۴ درصد وزنی سبب افزایش محتوای کلروفیل a+b گردید (جدول ۵). در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیشترین محتوای کلروفیل a+b برگ به میزان ۳/۵۰ و ۳/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در بیوچار ۲ و ۴ درصد وزنی مشاهده شد. در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، بیوچار ۲ و ۴ درصد وزنی، سبب افزایش ۱۷ و ۱۸ درصدی محتوای کلروفیل a+b برگ زیره سبز نسبت به شاهد گردید (جدول ۵). همچنین در ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار توانست سبب افزایش محتوای کلروفیل a+b برگ شود (جدول ۵).

آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز: آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز برگ زیره سبز تحت تاثیر نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت، همچنین برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز برگ زیره سبز معنی دار بود (جدول ۴). افزایش نیترات کادمیوم سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز برگ زیره سبز شد (جدول ۵). همچنین در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده مشاهده نگردید. در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، اسید سالسیلیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار توانست سبب کاهش محتوای فعالیت آنزیم کاتالاز برگ شود (جدول ۵).

افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز برگ زیره سبز با افزایش مصرف نیترات کادمیوم مشاهده شد (جدول ۵). همچنین در شاهد تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده مشاهده نگردید.

جدول ۵- مقایسه میانگین (± خطای استاندارد) برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده روی کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل a+b، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه در زیره سبز

نیترات کادمیوم	ترکیبات اصلاح کننده	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	کلروفیل a+b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	کاتالاز (میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین)	آسکوربات پراکسیداز (میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین)	وزن خشک اندام هوایی (میلی‌گرم در بوته)	وزن دانه (میلی‌گرم در بوته)
شاهد (صفر)	بدون ترکیبات	۲/۷۷±۰/۰۳۱ a	۰/۹۲±۰/۰۱۴ b	۳/۶۹±۰/۰۳۵ b	۰/۲۲±۰/۰۰۲ a	۰/۸۶±۰/۰۰۷ a	۴۸۱±۲/۳۴۷ b	۰/۲۴±۰/۰۰۲ a
	بیوچار ۲ درصد وزنی	۲/۸۶±۰/۰۳۹ a	۱/۰۱±۰/۰۲۲ ab	۳/۸۷±۰/۰۵۹ ab	۰/۲۳±۰/۰۰۵ a	۰/۸۶±۰/۰۰۵ a	۴۹۸±۳/۵۵۲ ab	۰/۲۶±۰/۰۰۷ a
	بیوچار ۴ درصد وزنی	۲/۹۹±۰/۰۵۱ a	۱/۰۸±۰/۰۳۱ a	۴/۰۸±۰/۰۲۲ a	۰/۲۳±۰/۰۰۷ a	۰/۸۶±۰/۰۰۵ a	۵۲۰±۵/۳۵۰ a	۰/۲۶±۰/۰۰۶ a
	اسید سالسیلیک ۱۰۰ میکرومولار	۲/۷۸±۰/۰۳۰ a	۰/۹۳±۰/۰۱۳ b	۳/۷۲±۰/۰۴۲ b	۰/۲۳±۰/۰۰۴ a	۰/۸۶±۰/۰۰۳ a	۴۸۳±۳/۳۰۰ b	۰/۲۵±۰/۰۰۱ a
	اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار	۲/۷۷±۰/۰۳۳ a	۰/۹۶±۰/۰۰۶ ab	۳/۷۴±۰/۰۲۷ b	۰/۲۲±۰/۰۰۵ a	۰/۸۵±۰/۰۰۶ a	۴۸۵±۳/۱۴۳ b	۰/۲۴±۰/۰۰۲ a
۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک	بدون ترکیبات	۲/۴۷±۰/۰۰۹ c	۰/۸۲±۰/۰۱۲ b	۳/۲۹±۰/۰۰۸ c	۰/۴۸±۰/۰۰۷ a	۱/۲۷±۰/۰۲۰ a	۴۲۲±۴/۷۱۴ b	۰/۱۹±۰/۰۰۲ b
	بیوچار ۲ درصد وزنی	۲/۵۴±۰/۰۱۳ b	۰/۹۶±۰/۰۱۲ a	۳/۵۰±۰/۰۲۲ b	۰/۴۵±۰/۰۱۰ ab	۱/۲۳±۰/۰۱۷ ab	۴۵۹±۴/۵۷۳ ab	۰/۲۱±۰/۰۰۴ ab
	بیوچار ۴ درصد وزنی	۲/۶۳±۰/۰۱۱ a	۱/۲۵±۰/۰۲۴ a	۳/۶۸±۰/۰۳۲ a	۰/۴۲±۰/۰۱۱ abc	۱/۱۹±۰/۰۲۳ ab	۴۷۶±۳/۲۸۱ a	۰/۲۳±۰/۰۰۳ a
	اسید سالسیلیک ۱۰۰ میکرومولار	۲/۵۱±۰/۰۰۹ bc	۰/۸۳±۰/۰۱۲ b	۳/۳۴±۰/۰۰۶ c	۰/۳۹±۰/۰۱۴ bc	۱/۰۹±۰/۰۲۹ bc	۴۴۹±۹/۲۱۵ ab	۰/۲۰±۰/۰۰۶ ab
	اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار	۲/۵۲±۰/۰۰۹ bc	۰/۸۴±۰/۰۱۴ b	۳/۳۷±۰/۰۱۰ c	۰/۳۶±۰/۰۱۵ c	۰/۹۹±۰/۰۱۴ c	۴۵۵±۸/۲۷۸ ab	۰/۲۱±۰/۰۰۵ ab
۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک	بدون ترکیبات	۱/۹۲±۰/۰۱۴ c	۰/۷۲±۰/۰۱۴ a	۲/۶۴±۰/۰۱۲ c	۰/۵۸±۰/۰۰۷ a	۱/۳۸±۰/۰۱۰ a	۳۴۸±۹/۲۹۵ b	۰/۱۶±۰/۰۰۴ b
	بیوچار ۲ درصد وزنی	۲/۳۵±۰/۰۳۸ a	۰/۷۵±۰/۰۱۱ a	۳/۱۱±۰/۰۴۷ a	۰/۵۲±۰/۰۱۴ ab	۱/۳۵±۰/۰۱۲ ab	۴۱۹±۹/۸۳۷ a	۰/۱۹±۰/۰۰۵ ab
	بیوچار ۴ درصد وزنی	۲/۴۴±۰/۰۲۷ a	۰/۷۸±۰/۰۱۵ a	۳/۲۲±۰/۰۳۸ a	۰/۵۱±۰/۰۱۲ ab	۱/۲۹±۰/۰۰۱ bc	۴۲۵±۹/۷۲۳ a	۰/۲۰±۰/۰۰۵ a
	اسید سالسیلیک ۱۰۰ میکرومولار	۲/۰۶±۰/۰۲۰ bc	۰/۷۳±۰/۰۱۴ a	۲/۸۰±۰/۰۰۸ bc	۰/۴۹±۰/۰۱۳ b	۱/۳۰±۰/۰۰۵ b	۳۸۵±۵/۴۳۷ ab	۰/۱۸±۰/۰۰۳ ab
	اسید سالسیلیک ۲۰۰ میکرومولار	۲/۱۶±۰/۰۱۳ b	۰/۷۳±۰/۰۲۰ a	۲/۸۹±۰/۰۱۴ b	۰/۴۷±۰/۰۱۳ b	۱/۲۳±۰/۰۱۳ c	۳۸۹±۴/۸۷۱ ab	۰/۱۸±۰/۰۰۳ ab

در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، اسید سالسیلیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار توانست سبب کاهش ۱۴ و ۲۲ درصدی محتوای فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز برگ نسبت به شاهد شود. همچنین در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، محتوای فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز برگ در اسید سالسیلیک ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار و بیوچار ۴ درصد وزنی نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵).

وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه: وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه زیره سبز تحت تاثیر نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده قرار گرفت، همچنین برهمکنش نیترات کادمیوم و ترکیبات اصلاح کننده روی وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه زیره سبز معنی‌دار بود (جدول ۴). در شاهد (بدون نیترات کادمیوم)، بیشترین وزن خشک اندام هوایی زیره سبز با ۵۲۰ میلی‌گرم در بوته در بیوچار ۴ درصد وزنی مشاهده شد (جدول ۵). در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی سبب افزایش ۱۳ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد شد. همچنین در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، وزن خشک اندام هوایی زیره سبز در بیوچار ۲ و ۴ درصد وزنی نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵).

افزایش نیترات کادمیوم سبب کاهش وزن دانه زیره سبز شد (جدول ۵). در شاهد (بدون نیترات کادمیوم)، اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف ترکیبات اصلاح کننده با شاهد نشان نداد. از سوی دیگر در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیترات کادمیوم، بیوچار ۴ درصد وزنی توانست سبب افزایش ۲۱ و ۲۵ درصدی وزن دانه زیره سبز نسبت به شاهد شود (جدول ۵).

بحث و نتیجه‌گیری

قابلیت جذب و تجمع کادمیم با افزایش غلظت کادمیم در خاک توسط گیاهان افزایش می‌یابد [47]. کادمیم به دلیل تحرک زیاد در خاک به راحتی می‌تواند توسط گیاه جذب شود [9]. از سوی دیگر تأثیرات مثبت بیوچار با بی‌تحرک کردن فلزات سنگین در خاک‌های آلوده، قابلیت دسترسی و انتقال آنها توسط گیاهان را کاهش می‌دهد [53]. همچنین بیوچار به دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تشکیل کمپلکس فعال، می‌تواند یون‌های فلزات سنگین قابل تعویض را نیز کاهش دهد [19]. پیوند قوی فلزات سنگین مثل کادمیوم با بیوچار و ایجاد فرم‌های پایدار سبب کاهش معنی‌دار غلظت کادمیوم در شرایط استفاده از بیوچار نسبت به خاک معمولی می‌گردد [18]. همچنین گزارش شده است که اسید سالسیلیک با تاثیر بر فعالیت آنزیمی به طور قابل توجهی اثرات منفی تجمع فلزات سنگین را در گیاهان کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر اسید سالسیلیک باعث بهبود عوارض ناشی از جذب فلزات سنگین در خاک می‌شود [6].

تیمار ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات کادمیوم، نشت یونی را در مقایسه با شاهد (بدون نیترات کادمیوم) افزایش دادند. آسیب به غشای سلولی و افزایش نشت یونی در تنش فلزات سنگین به دلیل افزایش پراکسیداسیون لیپیدها می‌باشد [15]. محققان گزارش نمودند که فلز کادمیوم میزان نشت یونی را نسبت به شرایط بدون تنش (بدون فلزات سنگین) به دلیل خسارت به غشای سلولی افزایش می‌دهد [32]. بنابراین اسیدهای چرب اشباع نشده در غشاهای سلولی به دلیل بروز تنش اکسیداتیو مستعد تخریب‌های اکسیداتیو بوده که حاصل این فرایندها تشکیل محصولات تجزیه‌ای مانند مالون‌دی‌آلدهید می‌باشد [42]. از سوی دیگر اسید سالسیلیک اسید و بیوچار با مهار کادمیوم، جلوگیری از انتقال آن به اندام هوایی و کاهش بروز علایم سمیت کادمیوم از خسارت در اندام‌های مختلف گیاه می‌کاهد [1, 6]. می‌توان به نقش مثبت استفاده از بیوچار و اسید سالسیلیک در کاهش تنش اکسیداتیو و جلوگیری از تخریب غشای سلولی در شرایط تنش‌های فلزات سنگین

اشاره کرد [4]. گزارش شده است که برخی منابع اصلاح کننده مثل کودهای آلی با بهبود شرایط مناسب و تسهیل در جذب آب و عناصر غذایی سبب کاهش نشت یونی در شرایط تنش فلزات سنگین می‌شود [2].

محققان گزارش کردند که تنش فلزات سنگین سبب کمبود آب شده و اختلال در تعادل آبی گیاه رخ می‌دهد [34]. از سوی دیگر ترکیبات آلی بیوچار در شرایط تنش فلزات سنگین قابلیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و در نتیجه آب بیشتری در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. محققان ساختار مولکولی ترکیبات آلی مثل بیوچار، عامل اصلی حفظ بهتر رطوبت در خاک گزارش کردند [48]. گزارش شده است که استفاده از ترکیبات بیوچار و اسید سالسیلیک با افزایش پایداری و کاهش نفوذپذیری غشای پلاسمایی گیاهان، کمک شایانی به حفظ آب در سلول‌های گیاهی دارد [13].

نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که سطوح ۵۰ و ۱۰۰ نیترات کادمیوم میزان محتوای کلروفیل را نسبت به سطح شاهد کاهش دادند. از سوی دیگر استفاده از بیوچار ۵ درصد وزنی سبب افزایش میزان کلروفیل a، b و کل زیره سبز گردیده است. کادمیوم با تأثیر بر ترکیب لیپیدی غشا، متابولیسم کلروفیل و فعالیت فتوسیستم‌ها باعث کاهش در فعالیت فتوسنتزی گیاهان می‌شود [21]. با توجه به اینکه ترکیبات آلی مثل بیوچار به تدریج عناصر غذایی آزاد می‌کنند و نقش زیادی در حفظ رطوبت خاک دارند، در نتیجه سبب افزایش میزان کلروفیل شده است [28]. از سوی دیگر اسید سالسیلیک به طور قابل توجهی فعالیت های فتوشیمیایی فتوسیستم یک و دو، جریان الکترون از کوآنین A به پلاستوکینون، توزیع انرژی بین کمپلکس های رنگدانه-پروتئین را بهبود می‌بخشد، بنابراین احتمالا اسید سالسیلیک به دلیل درگیرکردن مکانیسم‌های دفاعی مولکولی بر عملکرد دستگاه فتوسنتزی تاثیر می‌گذارد [50]. گزارش شده است که تنش فلز سنگین کادمیوم سبب کاهش سرعت جذب دی‌اکسید کربن، کاهش کارایی فتوسنتزی، تخریب کلروفیل و همچنین اختلال در انتقال الکترون در فتوسیستم نوری می‌شود، اما استفاده از اسید سالسیلیک با تاثیر بر فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی سبب بهبود رشد می‌شود [38].

تیمارهای نیترات کادمیوم ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم، سبب افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز گردید. فعالیت این آنزیم‌ها در گیاهان با افزایش تنش‌های زیستی افزایش می‌یابد و همچنین تحمل به تنش در گیاهان توسط آنزیم‌های پاداکساینده حفظ می‌شود [45] ، بنابراین چنین استدلال می‌شود که افزایش سطوح آنزیم‌های پاداکساینده تحت تنش یک تأثیر بسیار مهم برای تحمل به تنش در گیاهان حساس می‌باشد. محققان بیان کردند که افزایش در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش کادمیوم به دلیل سنتز و فعال شدن این آنزیم‌ها در سیتوپلاسم سلولی می‌باشد [27]. گزارش شده است که ترکیبات بیوچار و یا اسید سالسیلیک احتمالا با جلوگیری از انباشت کادمیوم و یا کاهش اثرات سمی آن میزان فعالیت آنزیم‌های پاداکساینده را کاهش می‌دهد [3, 8].

محققان گزارش کردند که فلزات سنگین از جمله کادمیوم به دلیل تغییر در برخی صفات فیزیولوژیک مثل محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل، فعالیت آنزیم‌ها و ساختار غشای سلولی، رشد گیاهان را کاهش می‌دهند [38]. کادمیوم با ورود به سیتوپلاسم سلولی و ایجاد اختلال در متابولیسم آن منجر به کاهش رشد می‌شوند. همچنین فلزات سنگین با کاهش تورژسانس سلولی سبب کاهش تقسیم سلولی و مهار رشد را فراهم می‌آورند [25]. کاهش وزن خشک اندام هوایی تحت سمیت کلرید کادمیوم توسط دیگر محققان گزارش شده است [52]. از سوی دیگر بیوچار با تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک سبب افزایش حاصلخیزی خاک شده و در

نهایت موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین می‌شود [51]. همچنین اسید سالسیلیک با حفاظت از فعالیت بسیاری از آنزیم ها و تاثیر بر ساختار و نفوذپذیری غشا می‌تواند باعث افزایش تحمل و حفاظت از گیاه در برابر تنش فلزات سنگین شود و افزایش رشد و عملکرد را به همراه داشته باشد [22]. مشابه با نتایج این پژوهش گزارش شده است که ترکیبات بیوچار و یا اسید سالسیلیک به دلیل کاهش اثرات سمیت فلزات سنگین و بهبود صفات فیزیولوژیک سبب رشد گیاه داروبی مریم گلی شده است [4].

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که نیترات کادمیوم باعث اختلال در شاخص‌های فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد دانه زیره سبز شده است. از سوی دیگر استفاده از ترکیبات آلی بیوچار به عنوان یک کود آلی با کاهش جذب و تجمع کادمیوم در ریشه و اندام هوایی می‌تواند نقش مثبتی را در تعدیل اثرات منفی آن ایفا کند. همچنین اسید سالیسیلیک با حفاظت از فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها و تاثیر بر ساختار و نفوذپذیری غشا می تواند باعث افزایش تحمل و حفاظت از گیاه در برابر تنش نیترات کادمیوم شود. استفاده از بیوچار و اسید سالیسیلیک منجر به کاهش نشت یونی و افزایش محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ گردید. در مجموع نتایج این پژوهش اثرات موفق ترکیبات اصلاح کننده بیوچار و اسید سالیسیلیک را در بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی، افزایش وزن خشک اندام هوایی و وزن دانه را نشان داد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا، که صمیمانه ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر می‌نماییم.

منابع

۱. برقی، ع.، قلی پوری، ع.، قویدل، ا. و صدقی، م. ۱۴۰۰. اثر باکتری‌های محرک رشد، اسید سالیسیلیک و براسینواستروئید بر ویژگی‌های فیزیولوژیک خردل سیاه تحت تنش کادمیوم. پژوهش های تولید گیاهی (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۸(۱): ۱۶۸-۱۵۳. https://doi.org/ 10.22069/jopp.2021.17594.2624

۲. بلوچی، ح .ر.، امینی، ف.، موحدی دهنوی، م. و عطارزاده، م. ۱۳۹۶. تأثیر بسترهای مختلف کاشت بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت تنش فلزات سنگین. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی. ۶(۲۱): ۴۰-۲۷. https://doi.org/ 20.1001.1.23222727.1396.6.21.14.6

۳. پاداش، ع.، قنبری، ا و اصغری پور، م. ر. ۱۳۹۵. اثر سالیسیلیک اسید بر غلظت برخی عناصر غذایی، پروتئین و آنزیم های آنتی اکسیدانی ریحان (*Ocimum basilic*um) تحت تنش سرب. مجله زیست شناسی گیاهی. ۸(۲۷): ۳۲-۱۷. https://doi.org/10.22108/ijpb.2016.20691

۴. تیموری، آ.، اشرف امیری نژاد، ع. و قبادی، م. ۱۴۰۰. نقش بیوچار و اسید سالیسیلیک بر کاهش تنش سرب در گیاه مریم گلی (*Salvia officinalis* L.). مجله روابط خاک و گیاه. ۱۲(۱): ۱۰۸-۹۵. https://doi.org/ 10.47176/jspi.12.1.20161

۵. دژم ، م.، رجایی، م.، جوهری، ش. و طهماسبی، س. ۱۳۹۹. نقش محلول پاشی با نیتروژن، کلسیم و پتاسیم بر کاهش اثرات مخرب تنش شوری در زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) در شرایط آبکشت. مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۳ (۱): ۲۵۰-۲۳۷. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1726.1464

۶. رضایی، ب.، اشرف امیری نژاد، ع.، قبادی، م. ۱۴۰۱. اثرات متقابل سرب نیترات، سالیسیلیک اسید و بیوچار بر ویژگی‌های رشدی گیاه آویشن. مجله آب و خاک. ۳۶(۱): ۷۹-۶۷. https://doi.org/ 10.22067/jsw.2022.72977.1101

۷. فیضی، خ.، اشرف امیری نژاد، ع. و قبادی، م. ۱۴۰۰. بررسی اثرات بیوچار و اسید سالیسیلیک بر کاهش تنش سرب در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). مجله تحقیقات خاک و آب ایران. ۵۲ (۲): ۵۴۷-۵۳۹. https://doi.org/ 10.22059/ijswr.2020.313282.668795

۸. قیصری ، س.، نعمت پور، س. و صفی پورافشار، ا. ۱۳۹۴. اثر سالیسیلیک اسید و آسکوربیک اسید بر محتوای رنگیزه های فتوسنتزی و فعالیت برخی آنزیم های آنتی اکسیدان در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت تنش سرب. مجله پژوهش های

گیاهی (زیست شناسی ایران). ۲۸(۴): ۸۲۵-۸۱۴.
https://doi.org/ 20.1001.1.23832592.1394.28.4.13.4

9. Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M.F., Ok, Y.S., Murtaza, G. 2018. Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil. Environmental Science and Pollution Research, 25: 25668–25680. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8987-4.

10. Angelova, V., Ivanova, R., Pevicharova, G. and Ivanov, K. 2010. Effect of organic amendments on heavy metals uptake by potato plants. World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August, Brisbane, Australi, 84-87.

11. Arnon, D. E. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase (*Beta vulgaris*). Plant Physiology, 24: 1-15. https://doi.org/ 10.1104/pp.24.1.1.

12. Attarzadeh M, Balouchi HR, Rajaie M, Movahhedi Dehnavi M and Salehi A. 2019. Improvement of *Echinacea purpurea* performance by integration of phosphorus with soil microorganisms under different irrigation regimes. Agricultural Water Management, 221: 238-47. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.022.

13. Awad, M., Moustafa-Farag, M., Liu, Z., El-Shazoly, R.M., 2022. Combined Effect of Biochar and Salicylic Acid in Alleviating Heavy Metal Stress, Antioxidant Enhancement, and Chinese Mustard Growth in a Contaminated Soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1-13. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4496-5.

14. Bahrami, M., Jahantab, E., Mahmoudi, M.R., 2021. Clustering the organic soil amendments in combination with phytoremediation of heavy metals contaminated soil. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1-15. https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1961228.

15. Bilal, S., Shahzad, R., Imran, M., Jan, R., Kim, K.M., Lee, I.-J., 2020. Synergistic association of endophytic fungi enhances Glycine max L. resilience to combined abiotic stresses: Heavy metals, high temperature and drought stress. Industrial Crops and Products 143, 111931. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111931.

16. Bradford, M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Annual Review Biochemical, 72: 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3.

17. Cakmak, I., and J.H. Horst.1991. Effects of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). Physiologia Plantarum, 83:463- 468. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x.

18. Cheng, S., Liu, Y., Xing, B., Qin, X., Zhang, C., Xia, H., 2021. Lead and cadmium clean removal from wastewater by sustainable biochar derived from poplar saw dust. Journal of Cleaner Production, 314, 128074. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128074.

19. Dai, S., Li, H., Yang, Z., Dai, M., Dong, X., Ge, X., Sun, M., Shi, L. 2018. Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. Human Ecological Risk Assess, 24: 1887–1900. https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1429250.

20. Dayani, L., Raiesi, F., 2011. The role of compost in alleviating cadmium effects on microbial respiration and biomass, and phosphatase activity in soil, 25 (1): 161-173. https://doi.org/ 10.22067/jsw.v0i0.8517.

21. Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., 2019. Damage and protection of the photosynthetic apparatus under cadmium stress. Cadmium toxicity and tolerance in plants. Elsevier, pp. 275-298. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00011-5.

22. Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., 2020. The role of salicylic acid and gibberellin signaling in plant responses to abiotic stress with an emphasis on heavy metals. Plant Signaling & Behavior 15, 1777372. https://doi.org/10.1080/15592324.2020.177737.

23. Fan, Q., Sun, J., Quan, G., Yan, J., Gao, J., Zou, X., Cui, L., 2020. Insights into the effects of long-term biochar loading on water-soluble organic matter in soil: Implications for the vertical co-migration of heavy metals. Environment international 136, 105439. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105439.

24. Ghanati F, Morita A and Yokota H. 2002. Induction of suberin and increase of lignin content by excess boron in tabacco cell. Soil Science and Plant Nutrition, 48: 357-364. https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409212.

25. Ghori, N.-H., Ghori, T., Hayat, M., Imadi, S., Gul, A., Altay, V., Ozturk, M., 2019. Heavy metal stress and responses in plants. International journal of environmental science and technology, 16: 1807-1828. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02215-8.

26. Gjorgieva Ackova, D., 2018. Heavy metals and their general toxicity on plants. Plant Science Today, 5: 15-19. https://dx.doi.org/10.14719/pst.2018.5.1.355.

27. Guo, J., Qin, S., Rengel, Z., Gao, W., Nie, Z., Liu, H., Li, C., Zhao, P., 2019. Cadmium stress increases antioxidant enzyme activities and decreases endogenous hormone concentrations more in Cd-tolerant than Cd-sensitive wheat varieties. Ecotoxicology and environmental safety, 172: 380-387. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.069.

28. Hafez, E.M., Omara, A.E.D., Alhumaydhi, F.A., El-Esawi, M.A., 2021. Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on wheat plants by soil application of vermicompost and biochar. Physiologia Plantarum, 172: 587-602. https://doi.org/10.1111/ppl.13261

29. Hamid, Y., Tang, L., Hussain, B., Usman, M., Lin, Q., Rashid, M.S., He, Z., Yang, X., 2020. Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: A review. Science of the Total Environment, 707:136121. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136121.

30. Heath, R.L. and L. Packer. 1968. Photo peroxidation in isolated chloroplast kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Biochemistry and Biophysics, 125: 189-198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1.

31. Jadia C.D., and Fulekar M.H. 2008. Phytoremediation: The application of vermicompost to remove zinc, cadmium, copper, nickel and lead by sunflower plant. Environmental Engineering and Management 7 (5): 547-558. https://doi.org/ 10.30638/eemj.2008.078.

32. Khan, K.Y., Ali, B., Stoffella, P.J., Cui, X., Yang, X., Guo, Y., 2020. Study amino acid contents, plant growth variables and cell ultrastructural changes induced by cadmium stress between two contrasting cadmium accumulating cultivars of Brassica rapa ssp. chinensis L.(pak choi). Ecotoxicology and Environmental Safety 200, 110748. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110748.

33. Kohli, S.K., Handa, N., Kaur, R., Kumar, V., Khanna, K., Bakshi, P., Singh, R., Arora, S., Kaur, R., Bhardwaj, R., 2017. Role of salicylic acid in heavy metal stress tolerance: insight into underlying mechanism. Salicylic acid: a multifaceted hormone. Springer, pp. 123-144. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6068-7.

34. Kumar, V., Singh, J., Kumar, P., 2019. Heavy metals accumulation in crop plants: Sources, response mechanisms, stress tolerance and their effects. Contaminants in agriculture and environment: health risks and remediation 1, 38. https://doi.org/10.26832/AESA.2019.CAE.0161.04.

35. Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M.R., Wu, H., 2020. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. Plant Physiology and Biochemistry 148, 80-89. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006.

36. Mench, M.J., V.L. Didier, M. Loffler, A. Gomez and P. Masson. 1994. A mimicked 1n-situremediation study of metal contaminated soils with emphasis on cadmium and lead. Environmental Quality, 23: 58-63. https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300010010x.

37. Moghaddam M and Pirbalouti AG. 2017. Agro-morphological and phytochemical diversity of Iranian *Cuminum cyminum* accessions. Industrial Crops and Products, 99: 205-213. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.003

38. Moussa, H., El-Gamal, S.M., 2010. Effect of salicylic acid pretreatment on cadmium toxicity in wheat. Biologia Plantaru. 54, 315-320. https://doi.org/10.1007/s10535-010-0054-7.

39. Popova, L.P., Maslenkova, L.T., Ivanova, A., Stoinova, Z., 2012. Role of salicylic acid in alleviating heavy metal stress. Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change. Springer, pp. 447-466. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0815-4_21.

40. Qu, J., Yuan, Y., Zhang, X., Wang, L., Tao, Y., Jiang, Z., Yu, H., Dong, M., Zhang, Y., 2022. Stabilization of lead and cadmium in soil by sulfur-iron functionalized biochar: Performance, mechanisms and microbial community evolution. Journal of Hazardous Materials 425, 127876. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127876.

41. Rezaei, B., Amirinejad, A., Ghobadi, M., 2022. Interactive Effects of Pb (NO3) 2, biochar and salicylic acid on growth characteristics of thyme (*Thymus vulgaris* L.). Journal of Water and Soil. 36 (1): 67-79. https://doi.org/ https://doi.org/10.22067/JSW.2022.72977.1101.

42. Rizvi, A., Khan, M., 2019. Heavy metal-mediated toxicity to maize: oxidative damage, antioxidant defence response and metal distribution in plant organs. International Journal of Environmental Science and Technology 16, 4873-4886. https://doi.org/10.1007/s13762-018-1916-3.

43. Sall, M.L., Diaw, A.K.D., Gningue-Sall, D., Efremova Aaron, S., Aaron, J.-J., 2020. Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review. Environmental Science and Pollution Research 27, 29927-29942. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09354-3.

44. Sterckeman, T., Thomine, S., 2020. Mechanisms of cadmium accumulation in plants. Critical Reviews in Plant Sciences 39, 322-359. https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179.

45. Taie, H.A., Seif El-Yazal, M.A., Ahmed, S., Rady, M.M., 2019. Polyamines modulate growth, antioxidant activity, and genomic DNA in heavy metal–stressed wheat plant. Environmental Science and Pollution Research 26, 22338-22350. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05555-7.

46. Tufail, M.A., Iltaf, J., Zaheer, T., Tariq, L., Amir, M.B., Fatima, R., Asbat, A., Kabeer, T., Fahad, M., Naeem, H., 2022. Recent advances in bioremediation of heavy metals and persistent organic pollutants: A review. Science of the Total Environment, 157961. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157961.

47. Ubeynarayana, N., Jeyakumar, P., Bishop, P., Pereira, R.C., Anderson, C.W., 2021. Effect of soil cadmium on root organic acid secretion by forage crops. Environmental Pollution 268, 115839. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115839.

48. Wang, D., Li, C., Parikh, S.J., Scow, K.M., 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils–A multi-scale analysis. Geoderma 340, 185-191. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.012.

49. Weatherely, P. E. 1950. Studies in water relation on cotton plants, the field measurement of water deficit in leaves. New Phytologist 49, 81- 87. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1950.tb05146.x.

50. Yotsova, E.K., Dobrikova, A.G., Stefanov, M.A., Kouzmanova, M., Apostolova, E.L., 2018. Improvement of the rice photosynthetic apparatus defence under cadmium stress modulated by salicylic acid supply to roots. Theoretical and Experimental Plant Physiology 30, 57-70. https://doi.org/10.1007/s40626-018-0102-9.

51. Zeeshan, M., Ahmad, W., Hussain, F., Ahamd, W., Numan, M., Shah, M., Ahmad, I., 2020. Phytostabalization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. Journal of Cleaner Production 255, 120318. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120318.

52. Zeshan, A., Abdullah, M., Adil, M.F., Wei, D., Noman, M., Ahmed, T., Sehar, S., Ouyang, Y., Shamsi, I.H., 2022. Improvement of morpho-physiological, ultrastructural and nutritional profiles in wheat seedlings through astaxanthin nanoparticles alleviating the cadmium toxicity. Journal of Hazardous Materials 424, 126511. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120318.

53. Zhou, N., Wang, Y., Yao, D., Li, S., Tang, J., Shen, D., Zhu, X., Huang, L., Zhong, M., Zhou, Z. 2019. Novel wet pyrolysis providing simultaneous conversion and activation to produce surface-functionalized biochars for cadmium remediation. Journal of Cleaner Production, 221, 63-72. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.176.

The effect of biochar and salicylic acid on growth and physiological traits of cumin (*Cuminum Cuminum* L.) on soil cadmium contamination

Dindarlo Inalo S. and Madandoust M.

Dept. of Agronomy, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, I.R. of Iran

Abstract

Heavy metals are considered as one of the most important pollutants in the environment, and the application of biochar and salicylic acid can play a significant role in heavy metal tolerance in plants. This study was conducted in a factorial arrangement based on a randomized complete design in three repetitions in Shiraz city, 2021-22. The experimental factors included three levels of cadmium nitrate (0, 50, and 100 mg per kg of soil) and compounds at five levels of the control, two biochar levels (2% and 4% w/w), and 100 and 200 µM salicylic acid. The results indicated that the highest concentration of cadmium in roots and shoots, ion leakage, and malondialdehyde were observed in the 100 mg/kg soil of cadmium. On the other hand, biochar levels of 4% w/w at 50 and 100 mg of Cd soil decreased the concentration of cadmium in the root by 35% and 31%, respectively, compared to the control. In addition, at the level of 100 mg Cd, 14% and 16% reduction of malondialdehyde in leaves was observed in 100 and 200 µM salicylic acid. The catalase and ascorbate peroxidase activity in leaves indicated an increasing trend with the increased consumption of cadmium nitrate. Biochar levels of 4% w/w at 50 and 100 mg of Cd soil increased the seed weight by 21% and 25%, respectively, compared to the control. Finally, the results of this study indicated the successful effects of biochar and salicylic acid compounds in improving the physiological characteristics, weight of shoots, and seed.

Keywords: Biochar, Cadmium, Cumin, Salicylic acid