تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات آهن بر بهبود برخی صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک خرفه (*Portulaca oleracea* L.) تحت تنش کادمیوم

زهرا نوری آکندی[۱]، حسن مکاریان[۱*]، همت‌اله پیردشتی[۲]، محمدرضا عامریان[۱]، مهدی برادران فیروزآبادی[۱]، محمدعلی تاجیک قنبری[۳]

[۱] گروه زراعت، دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود، [۲] گروه زراعت، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، [۳] گروه گیاه‌پزشکی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۱/۲۸)

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات آهن بر بهبود برخی صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک خرفه تحت تنش کادمیوم، پژوهشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در سال ۱۳۹۶ و در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل شش سطح عنصر کادمیوم (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع کلرید کادمیوم) و پنج سطح محلول‌پاشی نانوذرات آهن (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم در لیتر) بود. نتایج نشان داد برهمکنش نانوذرات آهن و کادمیوم بر صفت سطح برگ، وزن خشک ریشه و پرولین در سطح پنج درصد و بر وزن خشک برگ و شاخص سبزینگی برگ در سطح یک درصد اثر معنی‌داری داشت. روند پاسخ سطح برگ با افزایش میزان کادمیوم در سطوح صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم در لیتر محلول‌پاشی نانوذرات آهن به‌صورت خطی و کاهشی بود اما با محلول‌پاشی ۰/۲۵ گرم در لیتر به‌صورت دوتکه‌ایی بیان شد. محلول‌پاشی نانوذرات آهن سبب افزایش میزان وزن خشک ریشه تا سطح ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک گردید اما در سطوح بالاتر وزن خشک ریشه با شیب کاهشی همراه بود. در این میان غلظت ۰/۵ گرم در لیتر محلول‌پاشی نانوذرات آهن با ۳٤/۸۰ درصد نسبت به شاهد بیشترین تأثیر را در افزایش وزن خشک ریشه داشت. میزان عدد اسپد در هر دو سطح ۰/۵ و ۰/۷۵ تا غلظت ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک به‌ترتیب ۱۱/۱۹ و ۲۸/۹۰ درصد به نسبت شاهد افزایش یافت. با این وجود در سطوح بالاتر کادمیوم عدد اسپد با روند کاهشی همراه بود. در مجموع، نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نانوذرات آهن می‌تواند تا حدودی در بهبود تحمل به تنش کادمیوم در گیاه خرفه مؤثر باشد.

کلمات کلیدی: تنش، گیاه‌پالایی، فلزات سنگین، نانوذرات

مقدمه

آلودگی فلزات سنگین یکی از اساسی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است که جهان مدرن با آن روبرو است (نادری و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به فعالیت‌های انسانی، افزایش صنعتی‌شدن، تولید انرژی، فعالیت‌های کشاورزی و تولید زباله‌های شهری، میزان فلزات سنگین در خاک افزایش یافته است (Megateli *et al.*, 2009). یکی از منابع بسیار مهم در افزایش آلودگی خاک، تخلیه فاضلاب‌های شهری است. این

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: h.makarian@shahroodut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

فاضلاب‌ها که برای آبیاری مزارع نیز استفاده می‌شوند، اگر چه سرشار از مواد مغذی هستند، اما همزمان منبعی غنی از فلزات سمی و سرطان‌زا نیز هستند (MacFarlane *et al*., 2007). فلزات سنگین قادر به انتقال و انباشت در گیاهان، حیوانات و انسان‌ها هستند که در غلظت‌های بالا درنهایت منجر به مهار رشد و حتی مرگ می‌شوند (Mishra *et al*., 2006). علاوه بر این فلزات سنگین دارای پایداری طولانی مدت در بدن انسان هستند که ممکن است مسائل بهداشتی خطرناکی را برای انسان ایجاد کند. عوامل متعددی از جمله گونه گیاهی و شرایط خرد اقلیم، آلودگی محیط‌زیست بر غلظت این فلزات در گیاهان تأثیر می‌گذارند (Broadley *et al*., 2007). این فلزات در غلظت‌های بالا سبب تخریب غشاء پلاسمایی سلول‌های گیاهی، اختلال در فعالیت آنزیم‌های سازنده پروتئین‌های ساختمانی و یا جایگزین‌شدن در ساختمان مواد حیاتی و درنتیجه مختل‌شدن فعالیت آنها می‌شوند (صدوری و قرچه، ۱۳۹۲).

در بین فلزات سنگین، کادمیوم (Cd) یکی از سمی‌ترین عناصر است که هیچ‌گونه ارزش غذایی برای گیاهان ندارد اما به‌راحتی توسط ریشه و بافت‌های گیاهی در سطوح بالا جذب می‌شود (Prasad, 1995). سازمان مواد سمی و بیماری‌های آمریکا (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) کادمیوم را در اولویت فهرست ده ماده خطرناک و سمی خود قرار داده است (Kammeno, 2000). کادمیوم به راحتی به گروه‌های سولفاتیک مانند پروتئین و آنزیم‌ها متصل شده و به این ترتیب عملکرد آنها را کاهش می‌دهد (Aibibu *et al*., 2010) همچنین این فلز می‌تواند از طریق تخریب کلروپلاست، کاهش فتوسنتز، تخریب آنزیم‌های درگیر در تثبیت CO_2، پراکسیداسیون لیپید و اختلال در متابولیسم نیتروژن و گوگرد سبب سمیت در گیاه شود (Das *et al*., 1997). مطالعات بسیاری در زمینه تأثیر مخرب کادمیوم بر رشد گیاهان انجام شده است که از جمله آنها می‌توان به گیاه خرفه (Yaghoubian *et al*., 2016)، بادرنجبویه (یعقوبیان و همکاران، ۱۳۹۵)، گوجه‌فرنگی (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۷) و گل جعفری (Shah *et al*., 2017) اشاره نمود. Abo-Kassem و همکاران (۱۹۹۵) نشان دادند که تیمار گیاهان گندم با غلظت ۱۰ میکرومولار کادمیوم باعث کاهش۲۰ درصدی میزان رشد نسبی در این گیاهان گردید. همچنین در مطالعه دیگری بیان شد میزان رشد نسبی گیاه جو تحت تنش کادمیوم با غلظت ٥٤ میکرومولار، ۸۵ درصد کاهش یافت (Vassilev, 2003).

روش‌های مختلفی برای ترمیم و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارند که در این بین روش‌های تثبیت، شستن خاک و گیاه‌پالایی به‌عنوان بهترین روش‌ها شناخته شده‌اند. گیاه‌پالایی که به آن پالایش سبز نیز گفته می‌شود، به‌عنوان یک روش پالایش درجا شناخته شده است که از گیاهان برای اصلاح خاک‌های آلوده استفاده می‌کند (Willey, 2007). خوشبختانه با استفاده از فناوری زیستی و توانایی‌های موجود در طبیعت میزان صدمه به محیط‌زیست را می‌توان به حداقل رساند. گیاه‌پالایی روش پالایشی است که شامل جذب، تغییر شکل، تجمع و یا تصعید آلاینده‌ها با کمک گیاهان برای زدودن آلودگی‌های آب، خاک و هوا است (Mulligan *et al*., 2001). به‌طور کلی، برای انتخاب یک گیاه برای هدف گیاه‌پالایی باید قدرت جذب بالای گیاه، تولید زیست‌توده بالا و انتقال زیاد عنصر از ریشه به ساقه مد نظر قرار بگیرد (Zhang *et al*., 1997).

از طرفی وضعیت تغذیه‌ای آهن می‌تواند بر جذب اختصاصی و غیراختصاصی فلزات سنگین اثرگذار باشد (Cohen *et al*., 2004). آهن جزء ساختار سیتوکروم‌ها، فردوکسین‌ها و لگ‌هموگلوبین‌هاست و در بسیاری از فعالیت‌های حیاتی گیاه از قبیل فتوسنتز، تنفس و تثبیت مولکولی نیتروژن شرکت می‌کند. همچنین آهن در ساختمان پروتئین‌های هِم (Heme-proteins) به‌کار رفته که این ترکیبات پیش‌نیاز ساخت کلروفیل هستند (Sanchez *et al*., 2005). فلزات سنگین قابلیت دسترسی و جذب آهن در آپوپلاست ریشه، جذب به درون سلول‌های ریشه و انتقال به بخش هوایی را کاهش می‌دهند و سبب می‌شوند آهن کمتری در اختیار برگ‌ها قرار گیرد. گزارش شده است که در وضعیت کمبود آهن،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

جذب و تجمع فلزات سنگین افزایش می‌یابد (Tafvizi *et al.*, 2014). به‌طور کلی کادمیوم در جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی در گیاه تداخل ایجاد می‌کند و بخشی از اثرات سوء آن در گیاه مربوط به برهم‌زدن تعادل عناصر غذایی و تداخل در جذب عناصر ضروری است. در آزمایشی نشان داده شد کادمیوم خاک موجب تخریب ساختمان برگ و درنتیجه اختلال در تعرق گیاه و جذب عناصر از ریشه می‌گردد. درنتیجه میزان انتقال عناصر ضروری برای گیاه در قسمت‌های بالای خاک کاهش می‌یابد. از طرفی فقدان آهن می‌تواند ژن‌های مؤثر بر جذب این عنصر را فعال کند که این ژن‌ها ممکن است جذب و انتقال فلزات دو ظرفیتی از قبیل روی و کادمیوم را نیز تسهیل کند (Cohen *et al.*, 1998). هر چند وجود برخی فلزات از جمله آهن در خاک برای رشد طبیعی گیاهان ضروری است، غلظت‌های بالای این عناصر از طریق افزایش رادیکال‌های آزاد سمی و القا تنش اکسیداتیو می‌تواند عاملی برای بازدارندگی رشد و ایجاد علائم سمیت شود (Suh *et al.*, 2002)، بنابراین تعیین میزان مطلوب آن از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو در کشاورزی استفاده از ترکیبات نانو در تغذیه گیاه است (Rezai *et al.*, 2010) زیرا جذب و انتقال این ترکیبات از طریق برگ به سهولت انجام می‌شود (Liu *et al.*, 2006). نانوکودها خصوصیات مطلوب مانند غلظت مؤثر، قابلیت حل‌پذیری مناسب، ثبات و تأثیرگذاری بالا و رهایش کنترل‌شده را دارند که سبب افزایش کارایی عناصر غذایی می‌شوند (Naderi *et al.*, 2013). گیاه دارویی خرفه با اسم علمی *Portulaca oleracea* L. و با نام انگلیسی Purslane از تیره خرفه (Portulacaceae)، گیاهی گرمادوست است که مسیر فتوسنتزی آن از نوع C_4 بوده و قابل تبدیل به CAM است. خرفه حاوی مقادیر زیادی مواد با خواص درمانی فوق‌العاده و ترکیبات بی‌نظیر چربی مانند امگا ۳ (اسید لینولنیک) و اسیدهای چرب غیراشباع دیگر و همچنین دارای مقدار قابل‌ملاحظه‌ای ویتامین‌های A، C، E و بتا کاروتن است و توانایی خنثی‌کردن رادیکال‌های آزاد را دارا بوده و پتانسیل جلوگیری از بیماری‌های قلبی-عروقی، سرطان و بیماری‌های عفونی را دارا است (Safdari and Kazemitabar, 2009; Shidfar *et al.*, 2007). این گیاه از نقطه‌نظر فیزیولوژیکی دارای قابلیت تحمل بسیار بالا در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین بوده و گیاه مناسبی برای کاشت و پالایش محیط و خاک از فلزات سنگین به‌شمار می‌رود (Tiwari *et al.*, 2008). در زمینه تأثیر نانوذرات آهن بر تحمل به تنش غلامی و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که کاربرد نانوکلات آهن باعث کاهش میزان مالون دی‌آلدهید و افزایش پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و درنهایت سبب بهبود و افزایش رشد گیاه ریحان تحت تنش شوری گردید. در تحقیق دیگری اثنی‌عشری و انتشاری (۱۳۹۷) گزارش کردند که کاربرد نانوذرات آهن سبب افزایش میزان پروتئین و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش آلومینیوم گردید. طبق گزارش فتحی و زاهدی (۱۳۹۳)، محلول‌پاشی آهن و روی به شکل نانوذرات نسبت به شکل معمول آنها تأثیر بیشتری بر رشد گیاهان ذرت دارد. با این حال، شکل نانو از نظر تعدیل اثرات شوری بر رشد گیاه برتری نداشت. حیدری و همکاران (۱۳۹٤) نیز گزارش کردند در سطوح بالای تنش خشکی، محلول‌پاشی نانواکسید آهن سبب افزایش میزان رنگدانه‌ها، جذب عناصر کانی و درنهایت افزایش عملکرد دانه در گیاه کنجد را در پی داشت. در آزمایش Konate و همکاران (۲۰۱۷) نیز مشخص گردید که تجمع کادمیوم، مهار رشد ریشه و تنش اکسیداتیو در گیاهچه‌های خیار و گندم با افزودن نانوذرات آهن به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی امکان استفاده از نانوذرات آهن بر بهبود تحمل به تنش کادمیوم در گیاه خرفه در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹٦ در پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان واقع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارهای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

آزمایشی شامل شش سطح عنصر کادمیوم (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع کادمیوم کلرید) و پنج سطح محلول‌پاشی نانوذرات آهن (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم در لیتر) بود. ابتدا نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پایدارشده با اسید آسکوربیک (AAS – ZVIN) در دمای محیط از طریق احیای آهن کلرید ($Fecl_3$) توسط سدیم بر هیدرات ($NaBH_4$) براساس رابطه ۱ سنتز شد (Zhang *et al*., 2011; Huang *et al*., 2014; Savasari *et al*., 2015).

(رابطه ۱)

$$2FeCl_3 + 6NaBH_4 + 18H_2O \rightarrow 2Fe^0 + 6NaCl + 6B(OH)_3 + 21H_2$$

در ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول، شامل مخلوط ۰/۱۶ مولار سدیم بر هیدرات و ۰/۱ مولار سود (NaOH) در آب دی‌یونیزه آماده شد. سپس به‌طور جداگانه ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول (۳۰ میلی‌لیتر اتانول و ۷۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه) حاوی مخلوط ۰/۱ مولار آسکوربیک اسید و آهن کلرید ۰/۱ مولار تهیه شد. در مرحله بعد سدیم بر هیدرات حل‌شده با سود داخل بورت ریخته و به‌صورت قطره قطره (یک قطره در هر دو ثانیه) به محلول آهن کلرید اضافه گردید. در طول ساخت نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پایدارشده محلول به‌صورت یکنواخت و با سرعت ثابت توسط همزن برقی همزده و در پایان برای اطمینان کامل از شرایط احیا و اتمام واکنش، محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن برقی باقی ماند. به‌منظور تعیین اندازه نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پایدارشده نیز از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید (کاشانی و همکاران، ۱۳۹۷).

خاک مورد نظر برای آزمایش از عمق ۳۰ – ۰ سانتی‌متری خاک مزرعه پژوهشی دانشگاه برداشت و به نسبت دو به یک با ماسه مخلوط و از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. سپس خاک به شش قسمت مساوی تقسیم و مقادیر مورد نظر کادمیوم به آن اضافه و بین گلدان‌ها توزیع شد. ابتدا در هر گلدان ده بذر گیاه خرفه کاشته و پس از سبزشدن تنک شده و به پنج بوته در گلدان کاهش یافت. گلدان‌ها در گلخانه و در شرایط نور طبیعی و دمای مطلوب برای گیاه قرار گرفته و به‌صورت روزانه آبیاری شدند. اولین محلول‌پاشی در مرحله هشت برگی صورت گرفت که در دو مرحله به فاصله زمانی هفت روز یکبار انجام شد. ده روز پس از اتمام دوره محلول‌پاشی، بوته‌ها کف‌بر شده، وزن تر و خشک گیاهان با ترازوی دیجیتالی، ارتفاع بوته با خط‌کش، قطر ساقه با کولیس دیجیتالی سطح برگ با نرم‌افزار Digimizer، صفات فیزیولوژیک از جمله نشت الکترولیت (Lutts *et al*., 1995)، محتوای نسبی آب برگ (RWC)، شاخص سبزینگی برگ (عدد اسپد) با کلروفیل‌متر (SPAD-502, Minolta, Japan) و هدایت روزنه‌ای با استفاده از دستگاه پرومتر (مدل KR1310, KOREA) بر حسب واحد میلی‌مول بر متر مربع در ثانیه و صفات بیوشیمیایی شامل پراکسیداسیون لیپیدی غشا، هیدروژن پراکسید و پرولین اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ یک برگ از برگ‌های انتهایی گیاه برداشت و بلافاصله توزین و به لوله‌های آزمایش حاوی آب‌مقطر منتقل و بعد از ۲٤ ساعت وزن آماس برگ‌ها تعیین شد. سپس نمونه‌های برگی در آون در دمای ۷۲ درجه و به‌مدت ٤۸ ساعت خشک و محتوای رطوبت نسبی برگ‌ها با استفاده از رابطه ۲ به‌دست آمد (Schonfeld *et al*., 1988).

$$RWC = \frac{WF - WD}{WT - WD} \times 100$$ (رابطه ۲)

که در این رابطه WF: وزن تر برگ، WD: وزن خشک برگ و WT: وزن آماس برگ است.

به‌منظور اندازه‌گیری نشت الکترولیت نمونه برگی در لوله‌های آزمایش حاوی ده میلی‌لیتر آب‌مقطر قرار گرفت. پس از گذشت ۲٤ ساعت، هدایت الکتریکی هر نمونه با دستگاه EC متر (CON 410) انـدازه‌گیری شد (EC_1). به منظور اندازه‌گیری میزان کل نشت الکترولیت‌ها در اثر مرگ سلول، لوله‌های آزمایش در دستگاه بن‌ماری با دمای ۹۰ درجه و به‌مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شدند و مجدداً هدایت الکتریکی نمونه‌ها ثبت گردید (EC_2). سپس درصد نشت الکترولیت‌ها با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (Teutonica *et al*., 1993).

$$\text{نشت الکترولیت} = \frac{EC_1}{EC_2} \times 100$$ (رابطه ۳)

میزان هیدروژن پراکسید با استفاده از روش Alexieva و همکاران (۲۰۰۱) و براساس واکنش H_2O_2 با پتاسیم یدید (KI)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

تعیین گردید. در این روش ۵۰۰ میلی‌گرم از بافت تازه برگ در پنج میلی‌لیتر TCA ۰/۱ درصد در حمام آب یخ ساییده شد. عصاره حاصل به‌مدت ۱۵ دقیقه در g ۱۲۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. سپس بـه نیم میلی‌لیتر از محلول رویی، نیم میلی‌لیتر بـافر فسفات پتاسیم ده میلی‌مولار و اسیدیته ۷/۵ و یک میلی‌لیتر پتاسیم یدید یک مولار اضافه گردید. مخلوط واکنش به‌مدت یک ساعت در تاریکی در دمای اتاق قرار گرفت و سپس جذب نمونه‌ها در ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

پراکسیداسیون لیپیدی غشا براساس روش Stewart, و بولی (۱۹۸۰) اندازه‌گیری شد. ۰/۵ گرم از برگ‌های گیاه در ده میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ درصد تری‌کلرواستیک اسید هموژن و به‌مدت ده دقیقه در g ۱۵۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. دو میلی‌لیتر از محلول رویی حاصل با چهار میلی‌لیتر از محلول ۲۰ درصد تری‌کلرواستیک اسید محتوای ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک مخلوط شد. کمپلکس حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سپس به حمام آب سرد منتقل شد. نمونه‌ها مجدداً به‌مدت ده دقیقه در g ۱۰۰۰۰ سانتریفیوژ شدند. جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر ثبت و میزان پراکسیدشدن لیپیدها با استفاده از اختلاف بین طول موج‌های جذبی و ضریب خاموشی $155\ mmol^{-1}\ cm^{-1}$ به‌دست آمد.

اندازه‌گیری محتوای پرولین با روش Btes و همکاران (۱۹۷۳) انجام شد. در این روش نیم گرم برگ تازه گیاه در هاون کوبیده و در ده میلی‌لیتر سولفوسالسیلیک اسید سه درصد هموژن و عصاره به‌دست آمده صاف شد. سپس دو میلی‌لیتر استیک اسید و دو میلی‌لیتر محلول ناین‌هیدرین اسید به دو میلی‌لیتر عصاره صاف‌شده در یک لوله آزمایش اضافه گردید. لوله‌های آزمایش به‌مدت یک ساعت در حمام آب و دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و در پایان به یک بستر یخی منتقل شده و چهار میلی‌لیتر تولوئن به هر لوله آزمایش اضافه شد. غلظت پرولین محلول در تولوئن با اسپکتروفتومتر با توجه به منحنی استاندارد پرولین تعیین گردید.

درنهایت داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ تجزیه و جهت کمی‌سازی روند تغییرات صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک از تجزیه رگرسیونی و برازش معادلات خطی (رابطه ٤) و دو تکه‌ای (رابطه ٥) پیشنهاد شده توسط سلطانی و همکاران (Soltani *et al*., 2006) استفاده شد.

$$y = b_1 x + a \qquad \text{(رابطه ٤)}$$

(رابطه ٥)

$$\begin{aligned} y &= b_1 x + a && \text{if} \quad x \leq x_0 \\ y &= (b_1 x_0 + a) + b_2 (x - x_0) && \text{if} \quad x > x_0 \end{aligned}$$

که در آن y مقدار پیش‌بینی‌شده برای صفات مورد نظر، a مقدار ثابت در غلظت صفر تیمار مورد نظر، x غلظت تیمار، x_0 نقطه چرخش بین دو فاز معادله و b_1 و b_2 شیب تغییرات صفات (کاهشی یا افزایشی) به‌ترتیب در فاز یک و دو معادله هستند. رسم منحنی‌ها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش نشان داد که اثر ساده نانوذرات آهن بر ارتفاع بوته، قطر و وزن خشک ساقه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر کادمیوم بر ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن خشک ساقه و وزن خشک کل در سطح یک درصد اثر معنی‌داری نشان داد. برهمکنش نانوذرات آهن و کادمیوم نیز در صفت سطح برگ و وزن خشک ریشه در سطح پنج درصد و وزن خشک برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

طبق یافته‌ها پاسخ ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن خشک ساقه و وزن خشک کل به افزایش کادمیوم به‌صورت خطی و به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۶۵، ۰/۷۵۹، ۰/۸۷۹ و ۰/۸۵۵ بیان شد. با افزایش سمیت کادمیوم میزان ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن خشک ساقه و وزن خشک کل به‌ترتیب با شیب‌های ۱۰/۷۱-، ۰/۰۰۶۱-، ۰/۰۰۱۱- و ۰/۰۰۲۶- کاهش یافت (شکل ۱). همچنین با افزایش غلظت نانوذرات آهن روند ارتفاع بوته به صورت دوتکه‌ایی (با ضریب تبیین ۰/۷۱) و قطر ساقه به‌صورت خطی (با ضریب تبیین ۰/۸۱) بود (شکل ۲). افزایش غلظت نانوذرات آهن تا سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر سبب افزایش ٤/۳۵ درصدی ارتفاع بوته نسبت به سطح شاهد شد اما با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات آهن میزان ارتفاع بوته نسبت به

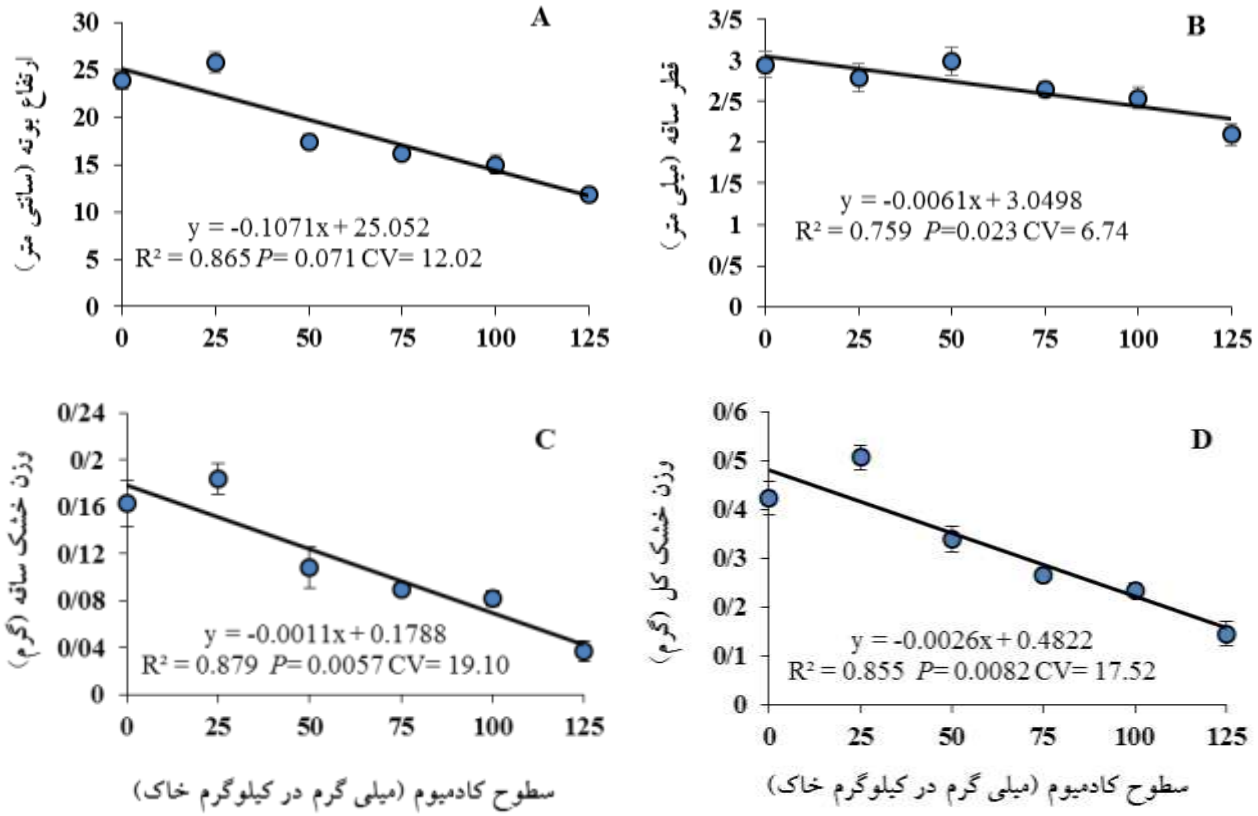
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات مورفولوژیک خرفه

منابع تغییر	df	ارتفاع بوته	قطر ساقه	سطح برگ	وزن خشک			
					برگ	ساقه	ریشه	کل
نانوذرات آهن (A)	٤	٣٦/٥٣ **	٠/٣٧٥ **	٤٢/٤٨ **	٠/٠٠٠٥ ns	٠/٠٠٢٦ **	٠/٠٠٢٢ **	٠/٠٠٢٤ ns
کادمیوم (B)	٥	٤٣٤/٩٣ **	٣/٧٤ **	١٩٧/٢٧ **	٠/٠٢١٩ **	٠/٠٤٤٤ **	٠/٠٢٥٨ **	٠/٢٦٠١ **
A × B	٢٠	٣/٤٠ ns	٠/٠٨ ns	٣/٣٥ *	٠/٠٠١٠ **	٠/٠٠٠٣ ns	٠/٠٠٨ *	٠/٠٠٢٣ ns
خطای آزمایشی	٦٠	٣/٤١	٠/٠٧	١/٧٩	٠/٠٠٣	٠/٠٠٠٦	٠/٠٠٠٤	٠/٠٠٢٠
ضریب تغییرات		١٠/٠٦	٩/٧٧	١٣/٨١	١٥/٢٦	٢٢/٨٥	٢٤/٨١	١٤/٢٠

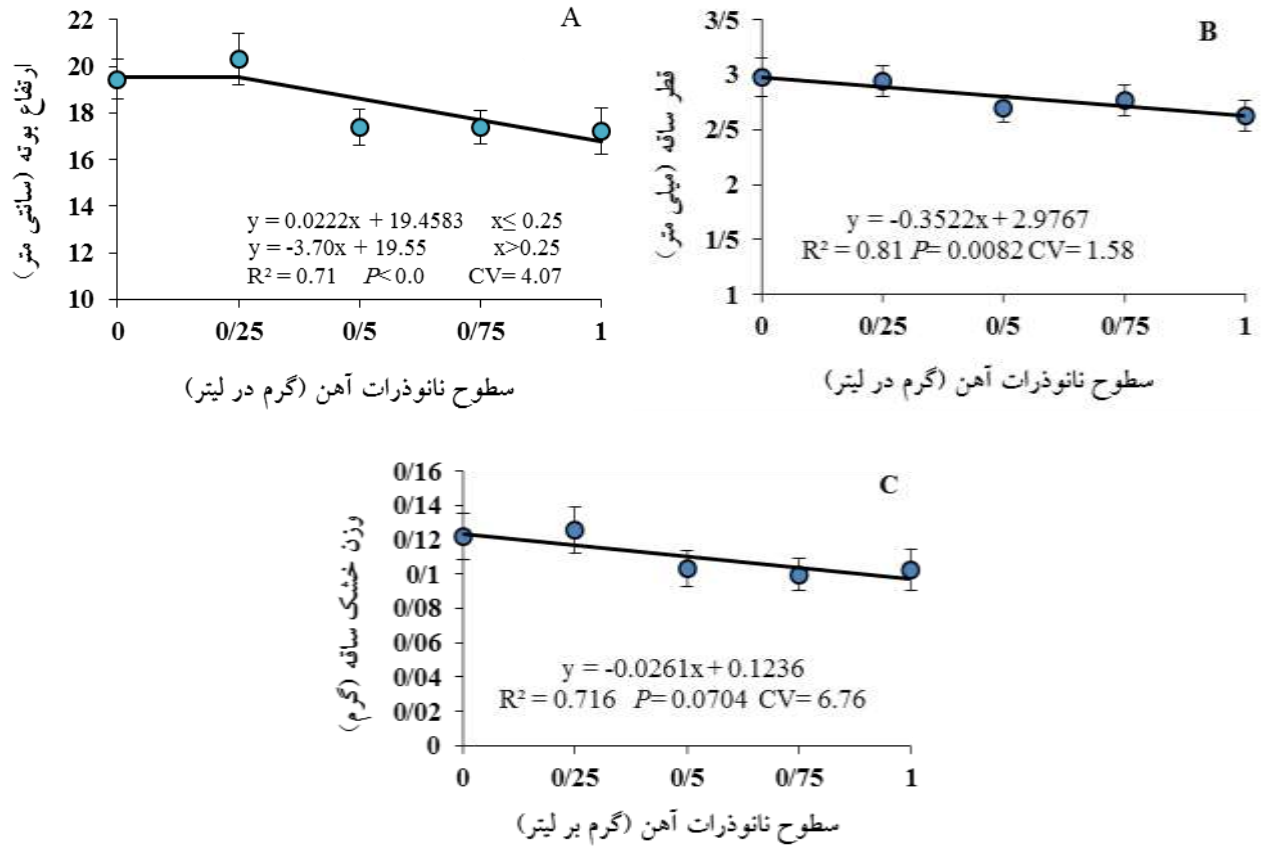
ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد



شکل ۱- روند پاسخ صفات ارتفاع بوته (A)، قطر ساقه (B)، وزن خشک ساقه (C) و وزن خشک کل (D) گیاه خرفه به سطوح مختلف کادمیوم

سطح شاهد کاهش یافت (شکل A ۲). از طرفی میزان قطر و وزن خشک ساقه نیز با افزایش غلظت نانوذرات آهن (با شیب ۰/۳۵۲- و ۰/۰۲٦-) به میزان ۱۱/۸۲ و ۷۷/٤۱ درصد نسبت به سطح شاهد کمتر شد (شکل B, C ۲). مهار رشد توسط کادمیوم می‌تواند به‌علت مهار تقسیم سلولی و سرعت طویل شدن سلول‌ها باشد که اغلب توسط مهار غیرقابل برگشت پمپ پروتون که مسئول این فرآیند است، رخ می‌دهد (Liu *et al.*, 2003). از دلایل دیگر کاهش رشد می‌توان به تحرک بالای کادمیوم در آوند آبکش و تجمع آن در هر یک از اندام‌های گیاه اشاره کرد که رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ را تحت تأثیر قرار داده

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]



شکل ۲- روند پاسخ صفات ارتفاع بوته (A)، قطر ساقه (B) و وزن خشک ساقه (C) گیاه خرفه به سطوح مختلف نانوذرات آهن

و کاهش رشد گیاه را سبب می‌شود (Hussain *et al.*, 2015).

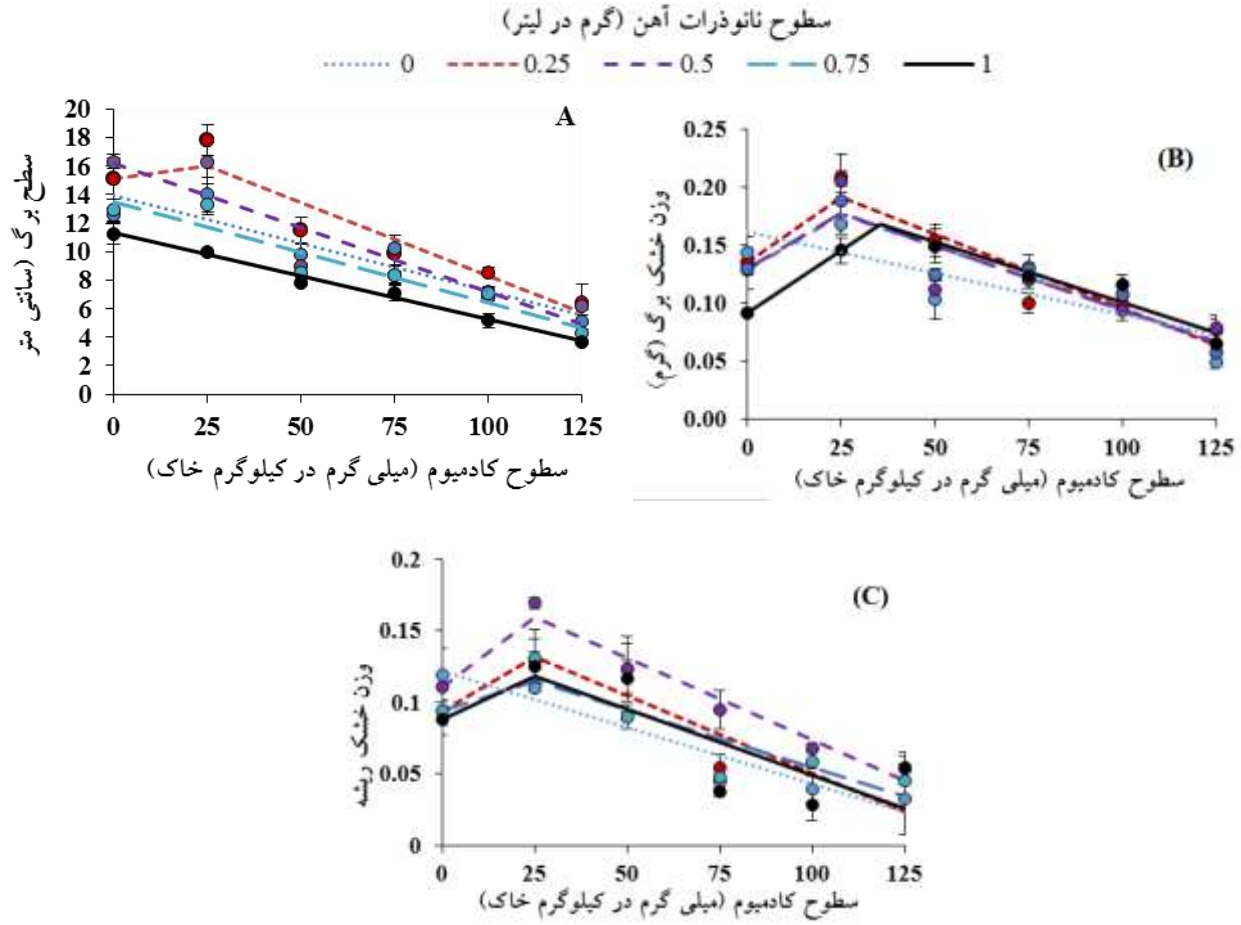
نتایج تجزیه رگرسیون نشان داد که روند پاسخ سطح برگ با افزایش میزان کادمیوم در سطوح صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم در لیتر محلول‌پاشی نانوذرات آهن به‌صورت خطی و کاهشی به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۶، ۰/۸۵، ۰/۹۰و ۰/۹۹ بود. به طوریکه با افزایش میزان کادمیوم، سطح برگ در این غلظت‌ها به‌میزان ۵۹/۵۸، ٦٢/٠٤، ٦٦/٦٠ و ٦٧/٠٣ درصد نسبت به سطح صفر کادمیوم کاهش یافت. در این میان بیشترین شیب کاهشی (۰/۰۸۹- واحد) در سطح محلول‌پاشی ۰/۵ گرم در لیتر مشاهده شد. اما روند پاسخ سطح برگ به افزایش کادمیوم در غلظت محلول‌پاشی ۰/۲۵ گرم در لیتر به‌صورت دوتکه‌ایی و با ضریب تبیین ۰/۹۰ بیان شد. به طوریکه میزان سطح برگ تا غلظت ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک به‌میزان ۱۵/۰۵ درصد به نسبت شاهد (با شیب ۰/۰۳۳۸ واحد) افزایش یافت اما در غلظت‌های بالای کادمیوم روند کاهشی (با شیب ۰/۱۰۲- واحد) نشان داد (شکل A ۳، جدول ۲). این روند در سمیت ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک می‌تواند بیانگر تأثیر مثبت محلول‌پاشی نانوذرات آهن در غلظت ۰/۲۵ گرم در لیتر باشد.

پاسخ وزن خشک برگ به افزایش کادمیوم خاک در تیمار عدم محلول‌پاشی به‌صورت خطی و کاهشی (ضریب تبیین ۰/٦٦٩) بود در حالیکه روند پاسخ وزن خشک برگ در هر سه سطح محلول‌پاشی نانوذرات آهن به‌صورت دوتکه‌ای بیان شد. با افزایش کادمیوم میزان وزن خشک برگ در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ محلول‌پاشی تا سطح ۲۵ و در غلظت یک گرم در لیتر محلول‌پاشی تا سطح ۳۵ افزایش یافت اما افزایش بیشتر از این سطوح کادمیوم، سبب کاهش وزن خشک برگ گردید (شکل B ۳، جدول ۲). روند پاسخ وزن خشک ریشه نیز در تیمار عدم محلول‌پاشی به‌صورت خطی و کاهشی (با ضریب تبیین ۰/۹۲۳) نشان داده شده بدین صورت که با افزایش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

جدول ۲- معادله مناسب توصیف‌کننده رابطه تیمارهای نانوذرات آهن بر پارامترهای مورفولوژیک گیاه خرفه در سطوح مختلف کادمیوم

نانوذرات آهن	سطح برگ	وزن خشک برگ	وزن خشک ریشه
0	y= -0.067x + 13.94 R^2= 0.865 *P*=0.0071 CV= 14.18	y= -0.0007x + 0.161 R^2= 0.669 *P*=0.046 CV= 22.52	y= -0.0008x+0.121 R^2= 0.923 *P*=0.0022 CV=16.33
0.25	y= 0.0338x + 15.146 x≤ 25 y= -0.1028x + 15.99 x>25 R^2= 0.907 *P*= 0.0035 CV= 12.04	y= 0.0022x + 0.1348 x≤ 25 y= -0.0012x + 0.1916 x>25 R^2= 0.890 *P*= 0.0047 CV= 13.01	y= 0.00151x+0.0943 x≤ 25 y= -0.00109x+0.1321 x>25 R^2= 0.889 *P*=0.0047 CV=18.15
0.5	y= -0.089x + 16.18 R^2= 0.850 *P*= 0.0089 CV= 18.64	y= 0.00192x + 0.1282 x≤ 25 y= -0.00109x + 0.1762 x>25 R^2= 0.760 *P*= 0.023 CV= 17.122	y= 0.00195x+0.1105 x≤ 25 y= -0.00114x+0.1593 x>25 R^2= 0.961 *P*=0.0005 CV= 8.55
0.75	y= -0.070x + 13.50 R^2= 0.909 *P*= 0.0032 CV=12.84	y= 0.0019x + 0.129 x≤ 25 y= -0.00112x + 0.1773 x>25 R^2= 0.883 *P*= 0.0053 CV= 12.33	y= 0.000861x+0.0937 x≤ 25 y= -0.00081x+0.1152 x>25 R^2= 0.797 *P*=0.0166 CV=19.24
1	y= -0.060x + 11.28 R^2= 0.990 *P*=0.000 CV= 4.03	y= 0.00215x + 0.0917 x≤ 35.37 y= -0.00104x + 0.1677 x>35.37 R^2= 0.931 *P*= 0.0018 CV= 7.95	y= 0.00121x+0.0885 x≤ 25 y= -0.00093x+0.1188 x>25 R^2= 0.665 *P*= 0.050 CV= 29.17



شکل ۳- روند پاسخ سطح برگ (A)، وزن خشک برگ (B) و وزن خشک ریشه (C) گیاه خرفه به سطوح کادمیوم تحت غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی نانوذرات آهن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

کادمیوم وزن خشک ریشه با ۷۲/٦٤ درصد نسبت به سطح شاهد کادمیوم کاهش یافت. روند پاسخ وزن خشک ریشه در تمامی سطوح محلول‌پاشی نانوذرات آهن به‌صورت دوتکه‌ایی بیان شد. به طوریکه محلول‌پاشی نانوذرات آهن در هر چهار سطح سبب افزایش میزان وزن خشک ریشه تا سطح ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک گردید اما در سطوح بالاتر از ۲۵ وزن خشک ریشه با شیب کاهشی همراه بود. در این میان غلظت ۰/۵ گرم در لیتر محلول‌پاشی نانوذرات آهن با ۳٤/۸۰ درصد نسبت به شاهد بیشترین تأثیر را در افزایش وزن خشک ریشه داشت (شکل C ۳، جدول ۲). Dehric و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که کادمیوم سبب کاهش وزن خشک اندام هوایی اسفناج می‌شود. Talatam و Parida (۲۰۰۹) کاهش وزن تر و خشک گیاه اسفناج در اثر کادمیوم را به سبب تأثیر منفی کادمیوم بر تولید انرژی در میتوکندری نسبت دادند. بر طبق نتایج این پژوهش در تمامی غلظت‌های نانوذرات آهن افزایش در میزان وزن خشک ریشه و برگ در سطوح پایین کادمیوم خاک مشاهده شد. به‌نظر می‌رسد با توجه به نقش آهن در ساختمان کلروفیل و سیستم فتوسنتزی گیاه (یوسف‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)، محلول‌پاشی نانوذرات آهن در سطوح مناسب با افزایش دسترسی گیاه به آهن موجب بهبود فتوسنتز و ماده‌سازی در گیاه شده و درنهایت وزن خشک گیاه را افزایش داده است. در همین زمینه نتایج مشابهی برای گیاه دارویی انیسون (پیرزاد و همکاران، ۱۳۹۲) و نعناع فلفلی (حیدری و همکاران، ۱۳۸۷) نیز پیش‌تر گزارش شده بود.

طبق یافته‌های حاصل از آزمایش اثر ساده محلول‌پاشی نانوذرات آهن بر محتوای نسبی آب برگ (RWC) در سطح یک درصد معنی‌داربود. تأثیر کادمیوم بر هدایت روزنه‌ایی و میزان نشت الکترولیت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهمکنش نانوذرات آهن و کادمیوم بر شاخص سبزینگی برگ (عدد اسپد) در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

آنالیز رگرسیون داده‌های حاصل بیانگر کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ به‌صورت خطی (با شیب ۰/۲۸۷- واحد) بود. میزان کاهش RWC در مقایسه با سطح شاهد کادمیوم حدود ٤٥ درصد بود (شکل A ٤). همچنین روند پاسخ نشت الکترولیت به‌صورت خطی و افزایشی بود و با افزایش غلظت کادمیوم خاک نشت الکترولیت با شیب ۰/۱٦۳ واحد و به‌میزان ۲٤/٦۸ درصد نسبت به سطح شاهد کادمیوم بیشتر شد (شکل C ٤). با بیشترشدن غلظت کادمیوم روند تغییرات هدایت روزنه‌ایی به‌صورت دوتکه‌ایی (با ضریب تبیین ۰/۹۷۹) بیان شد به طوریکه از سطح شاهد تا سطح ۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم خاک میزان هدایت روزنه‌ایی با شیب بیشتری (۰/۲۰۷- واحد) و در غلظت‌های بالاتر از این سطح با شیب کمتری (۰/۰۰۸- واحد) کاهش یافت (شکل B ٤). محدودیت جذب آب ناشی از تنش کادمیوم باعث تشکیل آبسیزیک اسید و هیدروژن پراکسید می‌شود. آبسیزیک اسید و سایر مولکول‌های پیام‌رسان، به برگ‌ها انتقال داده می‌شوند. هیدروژن پراکسید تولیدشده نیز باعث تشدید پاسخ آبسیزیک اسید می‌شود و منجر به بسته‌شدن روزنه از طریق فعال‌سازی کانال‌های کلسیم می‌شود (Schutzendubel and Polle, 2002). کاهش تعداد و اندازه روزنه‌ها ممکن است از دلایل دیگر کاهش هدایت روزنه‌ایی در تیمار کادمیوم باشد (Bergmann, 2004). روند پاسخ محتوای نسبی آب برگ به محلول‌پاشی نانوذرات آهن به‌صورت دوتکه‌ایی با ضریب تبیین ۰/۹۷۷بیان شد. افزایش غلظت محلول‌پاشی نانوذرات آهن تا سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ به‌میزان ٦/۱٦ درصد نسبت به سطح شاهد گردید. اما در غلظت‌های بالاتر محلول‌پاشی میزان محتوای نسبی آب برگ با شیب ۱۷/۸۸- واحد و به‌میزان ۱٤/۲۹درصد به نسبت سطح شاهد کاهش یافت (شکل ۵) که می‌تواند بیانگر عدم‌تأثیر محلول‌پاشی بر این پارامتر در سطوح بالاتر از ۰/۲۵ گرم در لیتر باشد. در اثر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی، گیاه در شرایط مطلوب رشدی قرار گرفته و با جذب آب، کارایی آن نیز بالا می‌رود. به طوریکه برای جذب آب، CO_2 کمتری از دست می‌دهد زیرا شیب غلظتی که در اتاقک زیرروزنه ایجاد می‌شود به قدری بالا خواهد رفت که تمایل برای جذب CO_2 چندین برابر خواهد

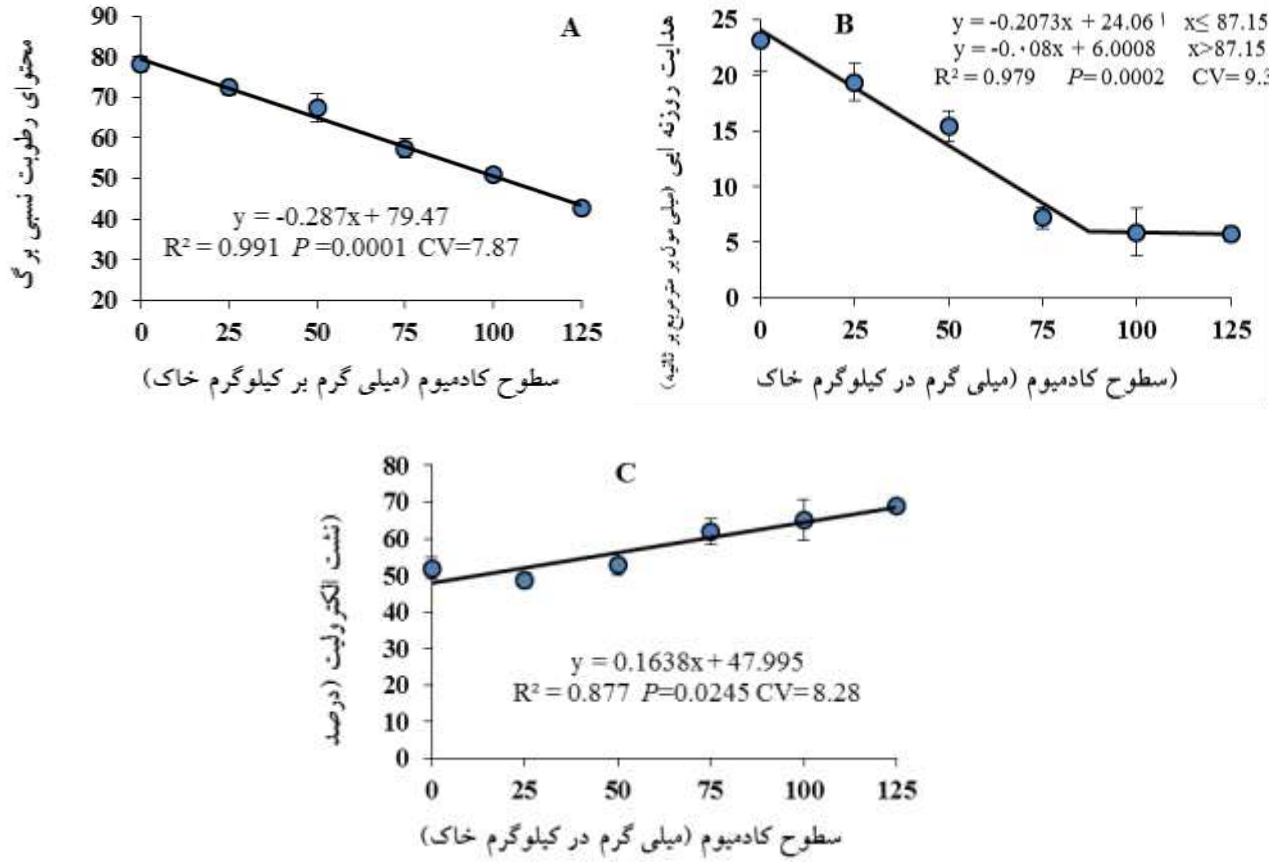
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات فیزیولوژیک خرفه

منابع تغییر	df	RWC	هدایت روزنه‌ایی	نشت الکترولیت	شاخص سبزینگی برگ
نانوذرات آهن (A)	٤	٤٧١/٣٧**	١٨/٦٩^{ns}	١٠١/٣٨^{ns}	١٦٧/٠٨**
کادمیوم (B)	٥	٢٧٤٤/٢٨**	٨٦١/٢٤**	١٢٤٩/٥٧**	٢٨٧/٥٤**
A × B	٢٠	٣٦/٥٢^{ns}	٦/٩٨^{ns}	٥٤/٤٩^{ns}	٣٢/٤٢**
خطای آزمایشی	٦٠	٣٦/٥٣	١٢/٠٥	٥١/٢٠	٧/٨١
ضریب تغییرات		٩/٨٣	٢٧/١٣	١٢/٥١	١٣/٠٣

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد



شکل ٤- روند پاسخ صفات محتوی رطوبت نسبی (A)، هدایت روزنه‌ایی (B) و نشت الکترولیت (C) گیاه خرفه به سطوح مختلف کادمیوم

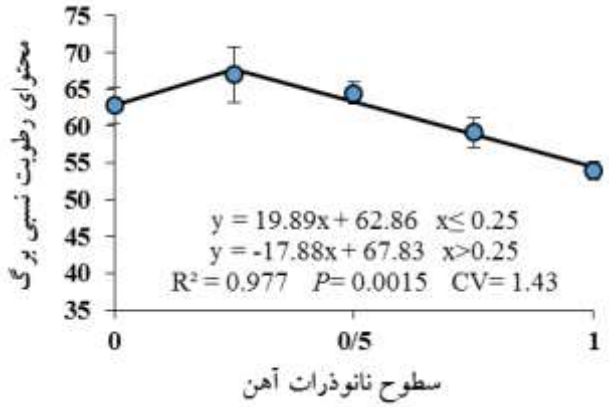
شد. بنابراین به‌ازای ورود هر مولکول CO_2 آب کمتری نیز خارج می‌شود که از این طریق محتوای نسبی آب برگ نیز افزایش می‌یابد (قدسی و همکاران، ۱۳۸۳).

روند پاسخ سبزینگی برگ به سطوح کادمیوم در غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی نانوذرات آهن نشان داد با افزایش غلظت کادمیوم سبزینگی برگ در سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۱ گرم در لیتر محلول‌پاشی نانوذرات آهن به خطی (به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۳، ۰/۹۵ و ۰/۸۷) کاهش یافت که در این میان سطح ۱ محلول‌پاشی با ۰/۰۷۵- واحد بیشترین شیب کاهشی را نشان داد (شکل ٦، جدول ٤). پاسخ سبزینگی برگ در سطوح ۰/۵ و ۰/۷۵ محلول‌پاشی به‌صورت دوتکه‌ایی (به‌ترتیب با ضریب ۰/۹۳ و ۰/۸۷) تبیین شد. میزان سبزینگی برگ در هر دو سطح ۰/۵ و ۰/۷۵ تا غلظت ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک به‌ترتیب ۱۱/۱۹ و ۲۸/۹۰ درصد به نسبت شاهد بیشتر شد. در

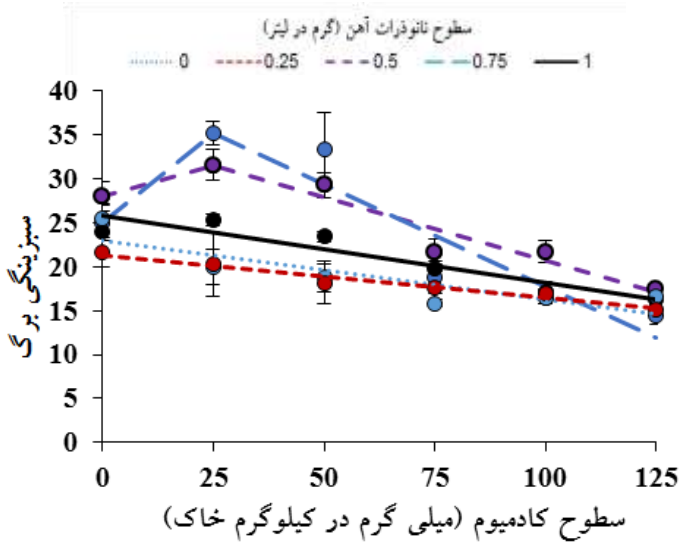
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

جدول ٤- معادله مناسب توصیف‌کننده رابطه تیمارهای نانوذرات آهن بر صفت عدد اسپد و پرولین گیاه خرفه در سطوح مختلف کادمیوم

غلظت نانوذرات آهن	عدد اسپد	پرولین
0	y = -0.066x + 23.01 R^2 = 0.732 *P*= 0.029 CV= 11.19	y = 0.0002x + 0.1183 x≤ 50 y = 0.00161x + 0.1283 x>50 R^2 = 0.844 *P*= 0.0096 CV= 14.19
0.25	y = -0.048x + 21.33 R^2 = 0.959 *P*= 0.006 CV= 2.89	y = 0.0012x + 0.139 R^2 = 0.959 *P*=0.0006 CV= 6.09
0.5	y = 0.138x + 28.03 x≤ 25 y = -0.143x + 31.48 x>25 R^2 = 0.934 *P*= 0.0017 CV= 6.074	y = 0.00059x + 0.1261 x≤ 21.54 y = 0.00133x + 0.1388 x>21.54 R^2 = 0.897 *P*= 0.0041 CV= 10.66
0.75	y = 0.411x + 25 x≤ 25 y = -0.233x + 35.27 x>25 R^2 = 0.877 *P*= 0.0059 CV= 13.54	y = 0.0007x + 0.122 R^2 = 0.844 *P*=0.0096 CV= 9.37
1	y = -0.075x + 25.74 R^2 = 0.875 *P*=0.0061 CV= 7.09	y = 0.0008x + 0.133 R^2 = 0.984 *P*=0.000 CV= 2.86



شکل ٥- روند پاسخ محتوای رطوبت نسبی برگ به سطوح مختلف نانوذرات آهن در گیاه خرفه



شکل ٦- روند پاسخ سبزینگی برگ به سطوح کادمیوم در گیاه خرفه تحت غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی نانوذرات آهن

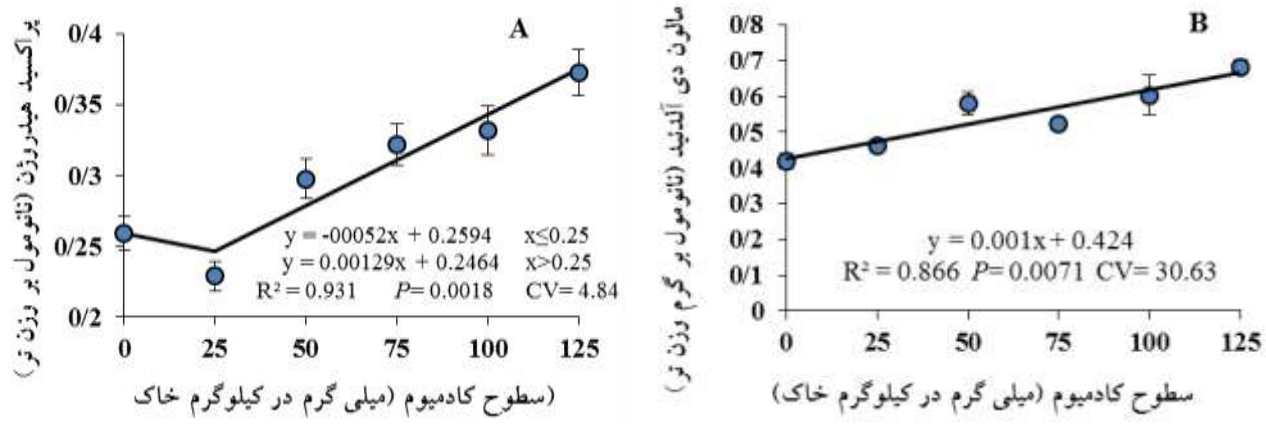
سطوح بالاتر کادمیوم سبزینگی برگ با روند کاهشی همراه بود. در این میان محلول‌پاشی ۰/۷۵ گرم نانوذرات آهن در لیتر از شیب کاهشی بیشتری در مقایسه با سطح ۰/۵ برخوردار بود (شکل ٦، جدول ٤). نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر صفات بیوشیمیایی خرفه

منابع تغییر	درجه آزادی	پرولین	هیدروژن پراکسید	مالون دی آلدئید
نانوذرات آهن (A)	٤	۰/۰۰۸ **	۰/۰۰۱۷ ns	۰/۰۲۳ **
کادمیوم (B)	٥	۰/۰۳٤ **	۰/۰۳٦۲ **	۰/۱٤۱ **
A × B	۲۰	۰/۰۰۱٤ *	۰/۰۰۰٤ ns	۰/۰۰۳ ns
خطای آزمایشی	٦۰	۰/۰۰۰٦	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۲۹
ضریب تغییرات (درصد)		۱۳/٦٤	۹/۹۱	۱۰/۰۰۸

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

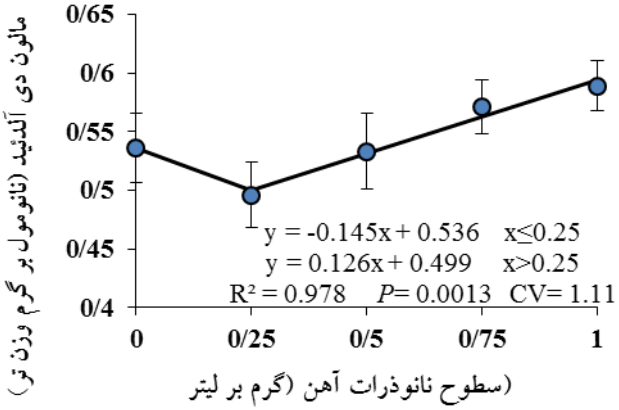


شکل ۷- روند پاسخ پراکسید هیدروژن (A) و مالون دی آلدئید (B) گیاه خرفه به سطوح کادمیوم

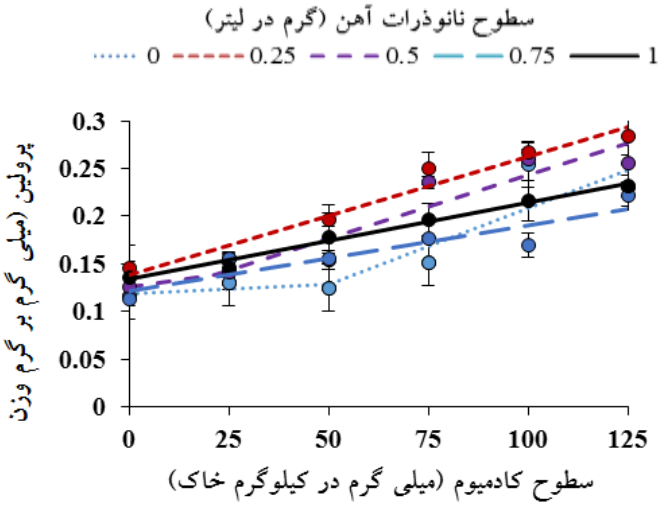
آزمایشی بر صفات بیوشیمیایی خرفه نشان داد که اثر ساده نانوذرات آهن بر محتوای مالون دی‌آلدئید و اثر کادمیوم بر میزان هیدروژن پراکسید و مالون دی‌آلدئید در سطح یک درصد معنی‌دار بود. برهمکنش نانوذرات آهن و کادمیوم بر محتوای پرولین در سطح پنج درصد اثر معنی‌داری داشت (جدول ۵).

طبق آنالیز رگرسیون صفات بیوشیمیایی، روند پاسخ هیدروژن پراکسید به افزایش غلظت کادمیوم به‌صورت دوتکه‌ایی با ضریب تبیین ۰/۹۳ بیان شد به طوریکه با افزایش غلظت کادمیوم تا سطح ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک میزان هیدروژن پراکسید ۷/۸۸ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. اما در غلظت‌های بالاتر کادمیوم شیب افزایشی (۰/۰۰۱۲۹ واحد) نشان داد (شکل a ۷). با افزایش غلظت کادمیوم خاک میزان مالون دی‌آلدئید به‌صورت خطی (با ضریب تبیین ۰/۸٦) افزایش یافت (شکل b ۷). از تبعات مهم افزایش غلظت فلزات سنگین در گیاه تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن است که موجب افزایش فعالیت رادیکال‌های سوپراکسید، هیدروکسیل و هیدروژن پراکسید می‌شود. رادیکال‌های تولیدشده موجب هیدرولیز ماکرومولکول‌هایی مانند DNA، پروتئین، آسیب به غشای سلولی و نشت یونی می‌شود (Ali *et al.*, 2015). افزایش محتوای مالون دی‌آلدئید به‌دلیل افزایش غلظت هیدروژن پراکسید در محیط ناشی از تنش ایجادشده است که درنهایت موجب آسیب به غشای سلول می‌شود (Xiao *et al.*, 2008). پاسخ محتوای مالون دی‌آلدئید به سطوح محلول‌پاشی نانوذرات به صورت دوتکه‌ایی بود به طوریکه محتوای مالون دی‌آلدئید از سطح شاهد تا ۰/۲۵ گرم در لیتر به‌میزان ۷/٤۸ درصد کاهش در حالیکه در غلظت‌های بالاتر از ۰/۲۵ با شیب ۰/۱۲٦ واحد افزایش یافت (شکل ۸). روند پاسخ پرولین به سطوح کادمیوم در در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۷۵ و ۱ گرم در لیتر محلول‌پاشی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]



شکل ۸- روند پاسخ مالون دی آلدئید گیاه خرفه به سطوح مختلف نانوذرات آهن



شکل ۹- روند پاسخ پرولین به سطوح کادمیوم در گیاه خرفه تحت غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی نانوذرات آهن

نانوذرات آهن به‌صورت خطی (به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۵، ۰/۸٤ و ۰/۹۸) بیان شد به طوری‌که با افزایش غلظت کادمیوم میزان پرولین به نسبت شاهد افزایش یافت که در این میان سطح ۰/۲۵ با ۰/۰۰۱۲ واحد بیشترین شیب افزایشی را داشت. روند پاسخ پرولین در سطوح عدم محلول‌پاشی و ۰/۵ گرم در لیتر به‌صورت دوتکه‌ایی به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸٤ و ۰/۸۹ نشان داده شد. در تیمار عدم‌محلول‌پاشی میزان پرولین تا سطح ۵۰ کادمیوم با شیب کمتری (۰/۰۰۰۲ واحد) و در غلظت‌های بالاتر از ۵۰ کادمیوم با شیب بیشتری (۰/۰۰۱٦ واحد) افزایش یافت. در غلظت ۰/۵ گرم در لیتر محلول‌پاشی میزان پرولین تا سطح ۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک (با شیب ۰/۰۰۰۵۹ واحد) به‌میزان ۹/۱٦ درصد به نسبت شاهد افزایش یافت در صورتیکه در غلظت‌های بالاتر از ۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک میزان پرولین با شیب بیشتری (۰/۰۰۱۳۳ واحد) افزایش یافت (شکل ۹). نتایج حاصل بیانگر افزایش میزان پرولین گیاه در سطوح محلول‌پاشی نانوذرات آهن به نسبت سطح شاهد است. تجمع پرولین در گیاهان تحت تنش با کاهش خسارت در غشا سلولی و پروتئین‌ها در ارتباط است. همچنین پرولین به‌عنوان یک اسمولیت، جاروب کننده رادیکال‌ها، تثبیت‌کننده ماکرومولکول‌ها و یک جز دیواره سلولی عمل می‌کند که با جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها باعث حفظ تمامیت غشا می‌گردد (Hayat *et al.*, 2012). در آزمایش Konate و همکاران (۲۰۱۷) نیز مشخص گردید که افزودن نانوذرات آهن، تجمع کادمیوم، مهار رشد ریشه و تنش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

اکسیداتیو در گیاهچه‌های هر دو گیاه خیار و گندم را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. از دلایل آن می‌توان به فعال‌سازی سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی با افزودن نانوذرات آهن و درنتیجه ایفای نقش محافظتی در برابر تنش اکسیداتیو اشاره نمود.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی نانوذرات آهن با افزایش پارامترهایی مانند سطح برگ، وزن خشک ریشه، برگ و عدد اسپد سبب بهبود رشد گیاه و با افزایش میزان پرولین سبب افزایش تحمل گیاه در برابر شرایط تنش کادمیوم گردید. بیشترین تأثیر نانوذرات آهن در سطح ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم خاک مشاهده شد. در مجموع، می‌توان اظهار داشت که محلول‌پاشی برگی گیاه خرفه با نانوذرات آهن می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش اثرات سو ناشی از تنش کادمیوم تلقی گردد و درنهایت افزایش رشد و عملکرد گیاه را در پی داشته باشد. با این وجود شناخت دقیق اثربخشی نانوذرات آهن نیازمند پژوهش‌های بیشتری است.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شده که بدین وسیله سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

اثنی‌عشری، ا. و انتشاری، ش. (۱۳۹۷) مقایسه اثرات کلرید آهن، کلات آهن و نانوآهن بر مکانیسم‌های آنزیمی و غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدانی گیاه بادرنجبویه تحت تیمار آلومینیوم. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی ۷: ۲۰٤-۱۹٤.

پیرزاد، ع. ل.، طوسی، پ. و درویش‌زاده، ر. (۱۳۹۲) اثر محلول‌پاشی عناصر آهن و روی بر صفات گیاهی و میزان اسانس آنیسون. علوم زراعی ایران ۱۵: ۲۳-۱۲.

حیدری، ف.، زهتاب سوماسی، ز.، جوانشیر، ع.، آلیاری، و. و دادپور، م. ر. (۱۳۸۷) تأثیر عناصر ریزمغذی و تراکم بوته بر عملکرد و خصوصیات مورفولوژیکی گیاه دارویی نعنا فلفلی (*Mentha piperata*). پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی ۸: ۱۳۱-۱۱۹.

حیدری، م.، گلیج، م.، قربانی، ه. و برادران فیروز آبادی، م. (۱۳۹٤) تأثیر تنش خشکی و محلول‌پاشی نانواکسید آهن بر عملکرد دانه، محتوای یونی و رنگدانه‌های نورساختی کنجد. علوم گیاهان زراعی ایران ٤٦: ٦۲۸-٦۱۹.

رحیمی، پ.، قنبرزاده، ز.، بهدا، آ. و محسن‌زاده، س. (۱۳۹۷) تأثیر متقابل سیلیکون و کادمیوم بر رشد و پارامترهای فیزولوژیکی گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*). مجله فرآیند و کارکرد گیاهی ۷: ۲۰۷-۲۰۰.

صدوری، م. و قرچه، ن. (۱۳۹۲) نقش قارچ‌های همزیست ریشه در احیای زمین‌های آلوده در احیای زمین‌های آلوده به مواد سمی. دانش بیماری‌شناسی گیاهی ۲:٦۰-٤۵.

غلامی، آ.، عباسپور، ح.، گرامی، م. و قربانی، ا. (۱۳۹۵) تأثیر محلول‌پاشی نانوکلات آهن بر ویژگی‌های رشد و فیزیولوژیک ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت تنش شوری. مجله علمی پژوهشی اکو فیزیولوژی گیاهان زراعی ۸: ۱۳۳-۱۱۷.

فتحی، ع. ر. و زاهدی، م. (۱۳۹۳) تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات اکسید آهن و روی بر رشد و محتوای یونی دو ژنوتیپ ذرت (*Zea mays*) در شوری‌های متفاوت خاک. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران ۱۲: ۱۱۷-۱۱۰.

قدسی، م.، کمالی، م.، چایچی، م. و مظاهری، د. (۱۳۸۳) ارزیابی حساسیت مراحل نمو گندم و همبستگی بین صفات مرتبط با عملکرد در شرایط تنش رطوبتی. هشتمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران، دانشگاه گیلان، ایران.

کاشانی، آ.، پیردشتی، ه.، بی‌پروا، پ. و عمادی، س. م. (۱۳۹۷) پاسخ صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی کلزا (*Brassica napus* L.) به کاربرد نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پایدارشده تحت تنش شوری. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی (در حال چاپ).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

نادری، م.، دانش شهرکی، ع. و نادری، ر. (۱۳۹۱) مروری بر گیاه پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین. فصلنامه انسان و محیط‌زیست ۲۳: ۴۹-۳۵.

یعقوبیان، ی.، سیادت، س. ع. ا.، مرادی‌تلاوت، م. ر. و پیردشتی، ه. ا. (۱۳۹۵) کمی‌سازی پاسخ رشد رویشی و مؤلفه‌های فلورسانس کلروفیل گیاه دارویی بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) به غلظت کادمیوم در خاک. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی ۲۳: ۱۶۵-۱۸۵.

یوسف‌زاده، س.، نقدی‌بادی، ه.، صباغ‌نیا، ن. و جان‌محمدی، م. (۱۳۹۵) تأثیر محلول‌پاشی نانوکلات آهن بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و شیمیایی گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.). فصلنامه گیاهان دارویی ۱۵: ۱۶۰-۱۵۲.

Abo-Kassem, E., Sharaf-El-Din, A., Rozema, J. and Foda, E. (1995) Synergistic effects of cadmium and NaCl on the gowth, photosynthesis, and ion content in wheat plants. Biologia Plantarum 37: 241-249.

Aibibu, N., Liu, Y. G., Zeng, G. M., Wang, X., Chen, B. B., Song, H. X. and Xu, L. (2010) Cadmium accumulation in *Vetiveria zizanioides* and its effects on growth. Physiological and Biochemical Characters Bioresource Technology 101: 6297-6307.

Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S. and Karanov, E. (2001) The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. Plant Cell and Environment 24: 1337-1344.

Ali, A., Deng, X., Hu, X., Gill, R. A., Ali, S., Wang, S. and Zhou, W. (2015) Deteriorative effects of cadmium stress on antioxidant system and cellular structure in germinating seeds of *Brassica Napus* L. Journal of Agricultural Science and Technology 17: 63-74.

Bergmann, D. C. (2004) Integrating signals in stomatal development. Current Opinion in Plant Biology 7: 26-32.

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I. and Lux, A. (2007) Zinc in plants. New Phytologist 173: 677-679.

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

Cohen, C. K., Fax, T. C., Garvin, D. F. and Kochian, L. V. (1998) The role of iron deficiency stress responses in stimulating heavy metal transport in plants. Plant Physiology 116: 1063-1072.

Cohen, C. K., Garvin, D. F. and Kochian, L. V. (2004) Kinetic properties of a micronutrient transporter from *Pisum sativum* indicate a primary function in Fe uptake from the soil. Planta 218: 784-792.

Das, P., Samantaray, S. and Rout, G. R. (1997) Studies on cadmium toxicity in plants: A review. Environmental Pollution 98: 29-36.

Dehric, G. S., Brar, M. S. and Melhi, S. S. (2007) Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium-contaminated soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 170: 495-499.

Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J. and Ahmad, A. (2012) Role of proline under changing environments. Plant Signaling and Contamination of Toxicology 85: 256-263.

Huang, S., Wang, L., Liu, L., Hou, Y. and Li, L. (2014) Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in china. A review. Agronomy for Sustainable Development 35: 369-400.

Hussain, I., Ashraf, M. A., Rasheed, R., Asghar, A., Sajid, M. A. and Iqbal, M. (2015) Exogenous application of silicon at the boot stage decreases accumulation of cadmium in wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. Brazilian Journal of Botany 38: 223-234.

Kammeno, O. (2000) River flow modeling using artificial neural networks. ASCE Journal of Hydrology Engineering 9: 60-63.

Konate, A., He, X., Zhang, Z., Ma, Y., Zhang, P., Alugongo, G. M. and Rui, Y. (2017) Magnetic (Fe_3O_4) nanoparticles reduce heavy metals uptake and mitigate their toxicity in wheat seedling. Sustainability 9: 1-16.

Liu, D., Jiang, W. and Gao, X. (2003) Effects of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tip cells of garlic. Biologia Plantarum 47: 79-83.

Liu, X., Feng, Z., Zhang, S., Zhang, J., Xiao, Q. and Wang, Y. (2006) Preparation and testing of cementing nano-sub nanocomposites of slower controlled release of fertilizers. Scientia Agricultura Sinica 39: 1598-604.

Lutts, S., Kinet, J. M. and Bouharmont, J. (1995) Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. Journal of Experimental Botany 46: 1843-1852.

MacFarlane, G. R., Koller, C. E. and Blomberg, S. P. (2007) Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. Chemosphere 69: 1454-1464.

Megateli, S., Semsari, S. and Couderchet, M. (2009) Toxicity and removal of heavy metals (cadmium, copper, and zinc) by *Lemna gibba*. Ecotoxicology and Environmental Safety 72: 1774-1780.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R. D., Govindarajan, R., Kuriakose, S. V. and Prasad, M. N. V. (2006) Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. Plant Physiology and Biochemistry 44: 25-37.

Mulligan, C. N., Young, R. N. and Gbbs, B. F. (2001) Remediation technologies for metal-contaminated soils and ground water: an evaluation. Engineering Geology 60: 193-207.

Naderi, M., Danesh-Shahraki, A. and Naderi, R. (2013) The role of nanotechnology in improving the use efficiency of nutrients and chemical fertilizers. Mon Nanotechnology 11: 16-32.

Prasad, M. N. V. (1995) Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants. Environmental and Experimental Botany 35: 525-545.

Rezai, R., Hoseyni, S. M., Shabanali, H. and Safa, L. (2010) Identify and analyze the barriers to the development of nanotechnology in the agricultural sector from the perspective of researchers. Journal of Science and Technology Policy 2: 17-26.

Safdari, Y. and Kazemitabar, S. K. (2009) Plant tissue culture study on two different races of purslane (*Portulaca oleracea* L.). African Journal of Biotechnology 8: 5906-5912.

Sanchez, A. S., Juarez, M., Sanchez-Andreu, J., Jorda, J. and Bermudez, D. (2005) Use of humic substances and amino acids to enhance iron availability for tomato plants from applications of the chelate FeEDDHA. Journal of Plant Nutrition 28: 1877-1886.

Savasari, M., Emadi, M., Bahmanyar, M. A. and Biparva, P. (2015) Optimization of Cd (II) removal from aqueous solution by ascorbic acid-stabilized zero valent iron nanoparticles using response surface methodology. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 21: 1403-1409.

Schonfeld, M. A., Johnson, R. C., Carver, B. and Morhinweg, D. W. (1988) Water relation in winter wheat as drought resistance indicator. Crop Science 28: 526-531.

Schutzendubel, A. and Polle, A. (2002) Plant response to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. Journal of Experimental Botany 53: 1351-1365.

Shah, K., Mankad, A. U. and Reddy, M. N. (2017) Cadmium accumulation and its effects on growth and biochemical parameters in *Tagetes erecta* L. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistr 6: 111-115.

Shidfar, F., Yarahmadi, S. H. and Jalali, M. (2007) Effects of purified omega-3 fatty acids in postmenopausal women with type-2 diabetes Iranian. Journal Endocrinal Metabolism 9: 229-234.

Soltani, A., Hammer, G. L., Torabi, B., Robertson, M. J. and Zeinali, E. (2006) Modeling chickpea growth and development: Phonological development. Field Crops Research 99: 1-13.

Stewart, R. R. C. and Bewley, J. D. (1980) Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiology 65: 245-248.

Suh, H., Kim, C. H., Lee, J. and Jung, J. (2002) Photodynamic effect of iron on photosystem II function in pea plants. Photochemistry and Photobiology 75: 513-18.

Tafvizi, M., Motesharezadeh, B. and Savaghebi, G. (2014) Investigating the effects of lead contamination and foliar application of iron on some physiological characteristics in two forage corn (*Zea mays* L.) hybrids in calcareous soil. Iranian Journal of Field Crop Science 45: 213-226.

Talatam, S. and Parida, B. (2009) Crop growth as influenced by zinc and organic matter in cadmium-rich polluted soils. Avaliable online at: http:\\scholarship.org/uc/item. Accessed 13 April 2009.

Teutonica, R. A., Palta, J. P. and Osborn, T. C. (1993) In vitro freezing tolerance in relation to winter survival of rapeseed cultivars. Crop Science 33: 103-107.

Tiwari, K., Dwivedi, S., Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R., Singh, N. and Chakraborty, S. (2008) Phytoremediation efficiency of *Portulaca tuberosa rox* and *Portulaca oleracea* L. naturally growing in an industrial effluent irrigated area in Vadodra, Gujrat, India. Environmental Monitoring and Assessment 147: 15- 22.

Vassilev, A. (2003) Barley seedlings as bio-indicators for water contamination by cadmium. Journal of Environmental Protection and Ecology 4: 354-360.

Willey, N. (2007) Phytoremediation methods and review. Methods in Biotechnology. Humana Press, Totowa, New Jersey.

Xiao, X., Tongbin, C., Zhizhuang, A. and Mei, L. (2008) Potential of *Pteris vittata* L. for phytoremediation of sites co-contaminated with cadmium and arsenic: the tolerance and accumulation. Journal of Environmental Sciences 20: 62-67.

Yaghoubian, Y., Siadat, S. A., Moradi, S. A., Telavat, M. R. and Pirdashti, H. (2016) Quantify the response of purslane plant growth, photosynthesis pigments and photosystem ii photochemistry to cadmium concentration gradients in the soil. Russian Journal of Plant Physiology 63: 77-84.

Zhang, M., Alva, A. K., Li, Y. C. and Calvert, D. V. (1997) Chemical association of Cu, Zn, Mn, and Pb in selected sandy citrus soils. Journal Soil Science 162: 181-188.

Zhang, M., He, F., Zhao, D. and Hao, X. (2011) Degradation of soil sorbed trichloroethylene by stabilized zero valent iron nanoparticles: Effects of sorption, surfactants, and natural organic matter. Water Research 45: 2401-2414.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]

Effect of foliar application of iron nanoparticles on improvement of some physiological and morphological traits of purslane (*Portulaca oleracea*) under cadmium stress

Zahra Noori Akandi [1], Hassan Makarian [1*], Hemmatollah Pirdashti [2], Mohammad Reza Amerian [1], Mehdi Baradaran Firozabadi [1], Mohammad Ali Tajik Ghanbary [3]

[1] Department of Agronomy, Collage of Agriculture, Shahrood University of Technology
[2.] Department of Agronomy, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
[3] Department of Plant protection, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
(Received: 06/01/2019, Accepted: 17/04/2019)

Abstract

In order to investigate the effects of foliar spraying of iron nanoparticles on improvement of some physiological and morphological traits of purslane (*Portulaca oleracea*) under cadmium stress, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. The experiment was conduted under greenhouse conditions at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University during 2017. The experimental factors included cadmium chloride in six levels (0, 25, 50, 75,100 and 125 mg/kg soil) and foliar spring of iron nanoparticles in five levels (0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 g/l). The results showed that the interction effects of iron nanoparticles and cadmium were significant on leaf area, root dry weight and proline content at 5% as well as leaf dry weight and chlorophyl contents at 1% probablity level. The leaf area responded a linear decrease trend with increasing cadmium levels at levels of 0, 0.5, 0.75 and 1 g/l of foliar spraying of iron nanoparticles. By contrast, as a segmented model at concentration of 0.25 g/l. Foliar spraying of iron nanoparticles at all four levels increased root dry weight to 25 mg/kg of cadmium, but at levels above 25, the root dry weight decreased at higher level of Cd. Meanwhile, the concentration of 0.5 g/l of foliar spraying of iron nanoparticles had the most effect on root dry weight by 34.80% increase as compared to the control. SPAD value increased in both levels of 0.5 and 0.75 to 25 mg/kg of soil cadmium, 11.19 and 28.99% respectively, as compared to the control. In general, our results, indicated that foliar application of iron nanoparticles was effective to improve cadmium tolerance in purslane plant in low cadmium concentrations. However, more research is needed to investigate the mechanism of iron nanoparticles.

Keywords: Stress, Phytoremediation, Heavy metals, Nanoparticles.

Corresponding author, Email: h.makarian@shahroodut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.35.18.9]