فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۳، شماره ۵۹، فروردین و اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۳ صفحه: ۳۶۵-۳۸۱
https://doi.org/10.22034/13.59.365

مقاله پژوهشی

تأثیر پلاسمای سرد اتمسفری و تنش کادمیوم بر خصوصیات بیوشیمیایی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه گندم

نسیم قاسم‌زاده[۱]، علیرضا ایرانبخش*[۱]، زهرا اوراقی اردبیلی[۲]، سارا سعادتمند[۱]، سودابه جهانبخش-گوده کهریز[۳]

[۱] گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۲] گروه زیست‌شناسی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

[۳] گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱)

چکیده

فلزات سنگین یکی از مهمترین مشکلات زیست محیطی بوده و باعث نگرانی‌های فراوانی به‌دلیل خصوصیات سرطان‌زایی، تجدیدناپذیری و تجمع بیولوژیکی شده است. با توجه به گسترش زمین‌های آلوده به فلزات سنگین و کشت ناگزیر غلات استراتژیک همچون گندم در این زمین‌ها و اینکه طبق تحقیقات گندم نسبت به سایر غلات، کادمیوم بیشتری را انباشته می‌کند، لذا هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر پلاسمای سرد اتمسفری و کادمیوم بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین و میزان پروتئین و قندهای محلول بر دو رقم کریم و گنبد بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردید. فاکتورها شامل ارقام گندم (رقم حساس گنبد و رقم مقاوم کریم)، پلاسمای سرد اتمسفری در سه سطح (شاهد، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه) و تیمار با فلز کادمیوم شامل چهار سطح (شاهد، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار) بود. نتایج نشان داد که میزان قند محلول، پروتئین، غلظت اسیدآمینه متیونین، آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز و طول ریشه تحت تأثیر اثر متقابل رقم × پلاسما × کادمیوم قرار گرفتند. نتایج مقایسه اثرات سه جانبه نشان داد که رقم گندم گنبد در پلاسما ۶۰ و کادمیوم ۱۵۰ با میانگین ۰/۲۲ (نانومول بر گرم) بیشترین میزان اسیدآمینه متیونین را دارا بود. به‌طورکلی از نتایج حاصل چنین استنباط می‌شود که تنش ناشی از افزایش غلظت کادمیوم و پلاسما بر فرآیندهای فیزیولوژیک گندم متفاوت بوده و هر دو رقم از مکانیسم‌های متفاوتی برای مقابله با تنش کادمیوم استفاده می‌کنند. ارقام گندم کریم و گنبد به‌منظور سازگاری و تحمل بیشتر در جهت مقابله با توسعه و تجمع غلظت‌های مسموم‌کننده این فلز سنگین در شرایط تنش تمام انرژی خود را صرف سنتز عوامل دخیل در مکانیسم دفاعی می‌کنند. نتایج ارزیابی ارقام نشان داد که در رقم کریم با افزایش غلظت کلرید کادمیوم میزان آنزیم کاتالاز، پلی‌فنل اکسیداز، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پرواکسیداز کاهش و بر مقدار قند محلول، پروتئین کل، لیزین و متیونین افزوده شد. همچنین در رقم گنبد با افزایش غلظت کلرید کادمیوم میزان پروتئین کل، آنزیم پلی‌فنل اکسیداز، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز کاهش یافت که نشان از آثار سمیت کادمیوم و تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌باشد. در نتیجه آسیب‌های اکسیداتیو و کاهش رشد را دنبال دارد و مقدار قند محلول آنزیم کاتالاز، مقدار لیزین و متیونین افزایش یافت. همچنین رقم کریم از نظر مقاومت به تنش کادمیوم متحمل‌تر از رقم گنبد است. بنابراین این تحقیق نشان داد که تیمار کادمیوم در حد ۱۵۰ میکرومولار در حضور پلاسمای سرد قادر بوده تا مکانیسم‌های دفاعی گیاه را تحریک و گیاه را در مقابل تنش‌ها متحمل سازد.

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: A-iranbakhsh@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

کلمات کلیدی: پلاسما، سوپراکسید دیسموتاز، کادمیوم، گندم

مقدمه

غلات به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بیشترین اهمیت را در تغذیه انسان دارند و در این میان گندم مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند (Sadeghi *et al*., 2021). گندم از مهم‌ترین گیاهان زراعی و دانه‌های غذایی در جهان است و بالاترین سطح کشت و تولید را در بین دیگر غلات دارد و به‌عنوان سلطان غلات شناخته می‌شود (Ahakpaz *et al*., 2020). با توجه به افزایش جمعیت جهان، همواره باید به فکر افزایش تولید این محصول بود تا نیازهای پیش‌روی جمعیت جهان را بتوان حل کرد. از طرف دیگر، عواملی نظیر تنش‌های غیرزیستی مانند فلزات سنگین سبب کاهش قدرت تولید می‌گردد (Farooq *et al*., 2012). فلزات سنگین مانند کادمیوم، کبالت و سرب برای گیاه بسیار سمی هستند و به سیستم فتوسنتزی آسیب می‌رسانند، بر متابولیسم تنفسی و نیتروژن تأثیر می‌گذارند و تعادل آب و جذب مواد غذایی را تغییر می‌دهند و در نهایت مانع رشد و نمو گیاه می‌شوند (Lange *et al*., 2017). علاوه بر این مقادیر بالای کادمیوم به‌دلیل ایجاد اختلالات متابولیسمی، تولید انواع اکسیژن فعال را در سلول افزایش می‌دهد و منجر به وقوع تنش اکسیداتیو در گیاه می‌گردد (Goncalvez *et al*., 2007). بنابراین عنصر کادمیوم برای انسان فوق‌العاده سمی است (Tolcin, 2009). کادمیوم با کاهش رشد و نمو و عملکرد گیاهان از جمله گندم همانند دیگر تنش‌های محیطی می‌تواند امنیت غذایی انسان را به خطر اندازد. انباشته شدن فلزات سنگین از جمله کادمیوم در محیط ریشه سبب کاهش جذب آب و مواد غذایی، کاهش انتقال آب و بر هم خوردن تعادل آب، مهار آنزیم‌ها، کاهش سوخت‌وساز سلولی، کاهش فتوسنتز، تنفس و تعرق، فقدان نیتروژن و فسفر و در نتیجه مهار رشد، تسریع پیری و حتی مرگ گیاه می‌گردد (Cheng and Huang, 2006). از بارزترین اثرات سمی این فلزات می‌توان با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن اشاره نمود که در آسیب‌رسانی به غشاهای پلاسمایی، اسیدهای نوکلئیک و رنگدانه‌های کلروپلاستی نقش به‌سزایی دارند (Juknys *et al*., 2012; Agrawal *et al*., 2013). تجمع گونه‌های فعال اکسیژن ممکن است در نتیجه عدم تعادل بین تولید آن‌ها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ایجاد شود. ترکیبات آنتی‌کسیدانی به نوع آنزیمی و غیرآنزیمی تقسیم می‌شوند. ترکیبات آنزیمی مانند کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و ترکیبات غیرآنزیمی از جمله گلوتاتیون و کاروتنوئیدها می‌باشد (Zhao *et al*., 2011). رشد روز افزون صنایع، افزایش بیش از حد مصرف کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، دخالت بشر در محیط‌زیست و توسعه شهرها موجب ایجاد انواعی از آلودگی‌ها در محیط شده است که از بین آنها، تجمع عناصر سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در جهان است. بر این اساس، غلظت انواع فلزات سنگین در اکثر خاک‌های کشاورزی افزایش یافته است (Mahmoudi *et al*., 2017). حلالیت زیاد کادمیوم در آب و تحرک آن در خاک سبب شده که امروزه به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم محیط زیست و به خصوص کشاورزی شناخته شود (Mahmoudi *et al*., 2019).

تنش‌های غیرزیستی مانند تنش فلزات سنگین می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد محصولات را کاهش دهند و خاک-هایی را که می‌توان گونه‌های تجاری مهم را کشت کرد، محدود کنند (Jacobsen *et al*., 2012; Mora *et al*., 2016). درک پاسخ گیاهان به تنش غیرزیستی، یک موضوع مهم و چالش برانگیز در تحقیقات گیاهی است. تجزیه و تحلیل‌های بیولوژیک- فیزیولوژیک به ما اجازه داده است تا تصویری از پاسخ‌هایی به تنش غیرزیستی در گیاهان مختلف به‌دست آوریم (Hirayama and Shinozaki, 2010). گیاهان استراتژی‌های مختلفی از جمله تولید آنتی‌اکسیدانت‌های شیمیایی، سیستم‌های آنزیمی و حفظ تورژسانس در طول دوره‌های تنش، حفظ فشار اسمزی سلول‌ها، برای غلبه بر تنش‌های غیرزنده دارند (Singhal *et al*., 2016; Loka *et al*., 2018). بنابراین، پاسخ‌های گیاهان به انواع تنش‌ها (تنش‌های زیستی و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

غیرزیستی) و تمرکز مطالعات فیزیولوژیکی (Foyer and Noctor, 2005; Zhu, 2016) در طی دهه‌های مختلف بوده است.

در سال‌های اخیر پلاسمای سرد به‌دلیل مقرون به صرفه بودن و مزایای گوناگون دیگری به‌طور گسترده مورد بررسی محققین قرار گرفته است. مزایای کاربرد پلاسمای سرد اتمسفری در کنترل بیماری‌های گیاهی از جمله بیماری‌های قارچی عبارتند از: عدم وجود اثرات نامطلوب گازها مانند سمیت، کاهش آلودگی‌های محیط‌زیست، عدم وجود خطرات برای انسان و حیوانات در مقایسه با سموم شیمیایی (Graves, 2012). گازهای به‌کار رفته در پلاسما می‌توانند گازهای هوایی یا آزاد مانند هلیوم و آرگون یا مخلوطی از انواع مختلف گازها با نسبت مناسب باشند. در نتیجه گونه‌های فعال اکسیژن می‌توانند با استفاده از آنزیم‌ها در یک سیستم غذایی واکنش نشان داده و ساختار پروتئین را که منجر به غیرفعال کردن آنزیم‌ها می‌شود، تغییر دهد (Tolouie *et al.*, 2017). اثر تحریک‌کنندگی پلاسمای سرد بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در گیاهان مختلف مانند گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی شیرین، گندم، جو دوسر، بادام‌زمینی و ذرت در زمان‌های مختلف قرار گرفتن در معرض پلاسمای سرد گزارش شده است (Sivachandiran and Khacef, 2017; Meng *et al.*, 2017; Ling *et al.*, 2016; Henselova *et al.*, 2012). با این حال، در برخی گزارش‌ها قرار گرفتن در مدت زمان طولانی‌تر در معرض پلاسمای سرد با کاهش رشد ریشه یا ساقه ارتباط مستقیم دارد (Sivachandiran and Khacef, 2017; Meng *et al.*, 2017; Henselova *et al.*, 2012). Souza و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزایش سطح برگ تحت تیمار با پلاسما باعث افزایش سرعت فتوسنتز در گیاهان می‌شود. طی آزمایشی فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در سیب و سیب‌زمینی تازه برش داده شده به‌ترتیب حدود ۶۲ و ۷۷ درصد کاهش یافته است (Bubler *et al.*, 2016). مطالعات متعددی نشان می‌دهد که پلاسما می‌تواند به‌طور مؤثری باعث افزایش استحکام و جوانه‌زنی بذر شود (Tong *et al.*, 2014; Ling *et al.*, 2014).

با توجه به گسترش زمین‌های آلوده به فلزات سنگین و کشت ناگزیر غلات استراتژیکی همچون گندم در این زمین‌ها و اینکه طبق تحقیقات گندم نسبت به سایر غلات، کادمیوم بیشتری را انباشته می‌کند (Wangstrand *et al.*, 2007)، در این تحقیق، اثر برهمکنش کادمیوم و پلاسمای سرد اتمسفری بر فیزیولوژی رشد و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین و میزان پروتئین و قندهای محلول در گیاه گندم بررسی شد.

مواد وروش‌ها

مواد ژنتیکی مورد استفاده، شرایط کاشت و نمونه‌برداری: این آزمایش به صورت فاکتوریل سه فاکتوره در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. بذرهای گندم (رقم کریم و رقم گنبد) جهت ضدعفونی قبل از کشت به مدت ده دقیقه در محلول هیپوکلرید سدیم ۱۰ درصد قرار گرفت و به وسیله آب‌مقطر کاملاً شستشو داده شدند (ISTA, 2017). سپس به تعداد ۲۰ عدد بذر در هر پتری‌دیش حاوی یک ورق کاغذ صافی استریل قرار داده شد. بعد از عمل کشت تمامی پتری‌دیش‌ها درون انکوباتور با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت سه روز قرار گرفتند. سپس دانه رست‌های سه روزه در داخل هر گلدان سایز چهار بزرگ که در این پژوهش ۹۶ گلدان بود با عمق کاشت ۱۰ سانتی‌متر در بستر پرلیت کشت شدند. روش کشت به صورت هیدروپونیک در محیط بسته (Close) بود. بدین منظور گلدان‌های پنج کیلویی ته‌بسته تهیه شدند و با پرلیت‌هایی با اندازه دانه ۳ تا ۵ میلی‌متری پر شدند. فاکتورها شامل ارقام گندم (رقم حساس گنبد و رقم مقاوم کریم ناشی از تنش‌های محیطی)، تیمار فلز کادمیوم در چهار سطح (شاهد، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار) و پلاسما در سه سطح (شاهد، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه) بودند و گلدان‌ها تحت شرایط میانگین ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی و دمای روزانه ۲۸ و دمای شبانه ۱۶ درجه سلسیوس کشت شدند. آبیاری گلدان‌ها با استفاده از محلول غذایی هوگلند با pH ۵/۵ مناسب برای جذب کادمیوم اعمال شد. اعمال

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

کادمیوم، در مرحله سه برگچه‌ای گندم انجام شد. در تیمار کادمیوم از سه غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار استفاده شد. تیمار پلاسما با استفاده از دستگاه دی‌بی‌دی پلاسما (DBD) مدل ED-DBD PLASMA 3MED ساخت ایران انجام شد. گیاهچه‌های شاهد و تیمار به طور جداگانه نمونه‌برداری شدند و نمونه‌ها به فریزر با دمای ۷۰- درجه سانتی‌گراد انتقال یافتند.

اعمال پلاسمای سرد (Cold plasma): CP در فشار اتمسفر بین دو صفحه شیشه‌ای به‌عنوان موانع دی‌الکتریک تولید می‌شود که الکترودهای مسی (شعاع = ۵/۵ سانتی‌متر) دو صفحه دایره‌ای را می‌پوشاند. فاصله بین دی‌الکتریک‌ها ۳ میلی‌متر بود. آرگون به عنوان یک گاز عملکردی بین دی‌الکتریک‌ها استفاده شد. هنگامی که پتانسیل در سراسر فضا به ولتاژ شکست رسید و باعث ایجاد تعداد زیادی ریز تخلیه شد، دی‌الکتریک به عنوان یک ماده پایدار عمل کرد. منبع تغذیه جریان متناوب ولتاژ بالا (AC) بهبودیافته برای تولید CP استفاده شد. فرکانس و ولتاژ CP به ترتیب روی ۲۳ کیلوهرتز و ۱۱ کیلو ولت ثابت است. داده‌های تشخیصی پلاسما توسط Iranbakhsh و همکاران (۲۰۱۸) توصیف شد.

استخراج پروتئین: برای استخراج پروتئین در برگ در بافر تریس – HCL ۰/۰۵ مولار و pH =۷/۵ خوب سائیده شد. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۳۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد. جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۵۹۵ خوانده شد (Bradford, 1976). در پایان مرحله سانتریفیوژ، محلول رویی (حاوی عصاره پروتئینی) جهت بررسی فعالیت کاتالاز و پلی‌فنل اکسیداز مورد استفاده قرار گرفتند.

سنجش آنزیم پلی‌فنل اکسیداز: پس از آماده‌سازی عصاره پروتئینی فعالیت سینتیکی آنزیم پلی‌فنل اکسیداز با روش Kar و Mishra (۱۹۷۶) بررسی شد. منحنی تغییرات جذب در طول‌موج ۴۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-VIS مدل S70 از شرکت Biochrom انگلستان خوانده شد. سرانجام فعالیت آنزیمی بر حسب تغییرات واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد.

سنجش آنزیم کاتالاز: پس از آماده‌سازی عصاره پروتئینی فعالیت سینتیکی آنزیم کاتالاز با استفاده از روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) همراه با تغییراتی سنجیده شد. منحنی تغییرات جذب در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. فعالیت آنزیمی برحسب تغییرات واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد.

سنجش آنزیم پراکسیداز: پس از آماده‌سازی عصاره‌های پروتئینی، برای سنجش فعالیت سینتیکی آنزیم پراکسیداز معرف زیر استفاده شد:

بافر تریس (pH=۷) ۱۰۰ میلی‌مولار، آب اکسیژنه ۵ میلی‌مولار و پیروگالول ۱۰ میلی‌مولار

۲/۵ میلی‌لیتر از مواد فوق را در حمام یخ با ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی مخلوط و منحنی تغییرات جذب در طول‌موج ۴۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر شد. فعالیت آنزیمی بر حسب واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد (Kar and Mishra, 1976).

سنجش پرولین، لیزین و متیونین برگ: استخراج پرولین از جوان‌ترین برگ‌ها با استفاده از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) صورت گرفت. جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. غلظت لیزین و متیونین به روش Losak و همکاران (۲۰۱۰) تعیین و توسط اسپکتروفتومتری با طول‌موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد.

سنجش قندهای کل برگ: استخراج کل کربوهیدارت‌ها از جوان‌ترین برگ‌ها با استفاده از روش Omokolo و همکاران (۱۹۹۶) صورت گرفت. میزان جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد.

مطالعه صفات اندازه‌گیری‌شده از طریق آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

مقدار قندهای کل برگ: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی رقم و کادمیوم و اثر متقابل دو جانبه رقم × پلاسما و پلاسما × کادمیوم و اثر متقابل سه جانبه رقم × پلاسما × کادمیوم در مورد قند محلول معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱). نتایج مقایسه اثرات سه جانبه نشان داد که (جدول ۲) ترکیب تیمار رقم گنبد در پلاسما ۱۲۰ در کادمیوم ۱۰۰ با میانگین ۲/۲۸۷ (میلی‌گرم بر گرم) بیشترین و ترکیب تیمار رقم گنبد در پلاسما ۶۰ در کادمیوم ۱۰۰ با میانگین ۰/۷۶ (میلی‌گرم بر گرم) کمترین میزان قند محلول را داشتند. بسیاری از شرایط تنش‌زای محیطی بر متابولیسم قندها و پخش مواد فتوسنتزی در گیاهان در حال رشد اثر می‌گذارنـد. در مطالعه هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) افـزایش مقدار قندهای احیاکننده تحت شرایط تنش کادمیوم گزارش شده است. افزایش میزان قند محلول در رقم گنبد تحت تیمار پلاسما ۱۲۰ و کادمیوم ۱۰۰ باعث فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن گردیده و منجر به مهار گونه‌های فعال اکسیژن شده است. در آزمایشی در گیاه گندم، نتایج نشان داد که تنش کادمیوم باعث افزایش سه برابری در فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز نسبت به شاهد گردید و میزان قند گلوکز با افزایش غلظت کادمیوم به دو برابر رسید (بهنام و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین در غلظت‌های پـایین کـادمیم بـر مقدار قندهای محلول اضافه شده است ولـی علـت کـاهش در غلظت‌های بالاتر احتمالاً به دلیل کـاهش فتوسـنتز یـا تحریـک سرعت تنفس است (Ahmad *et al.*, 2013). تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی در گندم نشان داد که اثرات پلاسمای سرد بر روی پوشش دانه پس از تیمارهای پلاسمای هوا، پلاسمای نیتروژن و پلاسمای آرگون رخ می‌دهد که بر رطوبت و نفوذپذیری دانه گندم تأثیر می‌گذارد .علاوه بر این، پلاسمای سرد با شدت متوسط نیز می‌تواند چندین واکنش فیزیولوژیکی را در دانه گندم فعال کند که در نتیجه باعث افزایش تولید قند و پروتئین محلول در نهال‌های گندم می‌شود (Meng *et al.*, 2017).

میزان پروتئین کل: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی رقم و کادمیوم و اثر متقابل دو جانبه رقم × پلاسما، دو جانبه رقم × کادمیوم و پلاسما × کادمیوم و اثر متقابل سه جانبه رقم × پلاسما × کادمیوم در مورد پروتئین، معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱). ترکیب تیمار رقم کریم در پلاسما ۶۰ در کادمیوم ۵۰ با میانگین ۲/۳۵ (میلی‌گرم بر گرم)، ۸/۰۴ درصد نسبت به تیمار شاهد دارای بیشترین و ترکیب تیمار رقم گنبد در پلاسما ۶۰ در کادمیوم ۱۵۰ با میانگین ۱/۵۶ (میلی‌گرم بر گرم) کمترین میزان پروتئین کل را به خود اختصاص دادند (جدول ۲). افزایش میزان پروتئین در اثر تیمار پلاسمای سرد در گیاه گندم گزارش شده است (Meng *et al.*, 2017). همچنین نتایج آزمایش Sadhu و همکاران (۲۰۱۷) بر گیاه لوبیا نشان داد که پلاسمای سرد به‌طور معنی‌داری باعث افزایش ۳۲/۲ درصدی پروتئین، ۲۰ درصدی طول ریشه اصلی و ۱۲۰ درصدی هدایت بذر در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد. همچنین فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتی مانند آمیلاز، پروتئاز و فیتاز بعد از تیمار افزایش یافت (Sadhu *et al.*, 2017). در این پژوهش میزان پروتئین کل گندم با افزایش میزان کادمیوم کاهش یافت. کاهش پروتئین به‌علت تجمع بیش از حد این فلزات و اتصال آنها با گروه‌های سولفیدریل پروتئین بوده که موجب تخریب ساختارهای پروتئینی و در نهایت منجر به آزادسازی رادیکال‌های آزاد می‌شود. کادمیوم با اختلال در متابولیسم نیتروژن از راه مهار فعالیت آنزیم‌هایی همچون گلوتامین سینتاز، گلوتامات سینتاز و نیترات ردوکتاز و همچنین احیاء نیترات موجب کاهش پروتئین می‌شود و رشد را متوقف می‌کند (Wang *et al.*, 2020). در رقم گندم کریم افزایش غلظت پروتئین برگ‌های گندم تحت تأثیر کادمیوم (غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) احتمالاً به دلیل افزایش سنتز برخی از آنزیم‌ها، سنتز پروتئین‌ها و پلی‌پپتیدهای درگیر در سیستم دفاعی سلول در برابر یون باشد.

آنزیم کاتالاز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی پلاسما و کادمیوم و اثر متقابل دو جانبه رقم × کادمیوم و پلاسما × کادمیوم و اثر متقابل سه جانبه رقم × پلاسما × کادمیوم در مورد کاتالاز معنی‌دار است (جدول ۱). رقم گندم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

جدول ۱- تجزیه واریانس قند محلول، پروتئین کل، پرولین، لیزین، متیونین و آنزیم‌های کاتالاز تحت تیمار کادمیوم و پلاسمای سرد اتمسفری در دو رقم گندم

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		قند محلول	پروتئین	پرولین	لیزین	متیونین	کاتالاز
تکرار	۳	۰/۰۰۸^{ns}	۰/۰۰۴*	۵/۱۳۹**	۰/۰۸۲^{ns}	۰/۰۱۱^{ns}	۰/۰۰۸*
A (رقم)	۱	۰/۳۷۸*	۰/۶۸۶**	۲/۱۴۶**	۰/۳۷۳**	۰/۰۱۷^{ns}	۰/۰۰۶^{ns}
B (پلاسما)	۲	۰/۰۴۹^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۸^{ns}	۰/۰۲۷^{ns}	۰/۰۳۵*	۰/۰۰۸*
A×B	۲	۲/۱**	۱/۸۴۹**	۰/۰۰۶^{ns}	۰/۱۴۹^{ns}	۰/۰۴۷**	۰/۰۱^{ns}
C (کادمیوم)	۳	۰/۲۸**	۰/۳۱۷**	۱/۰۹۱**	۰/۴۸۸**	۰/۰۹**	۰/۰۱۱*
A×C	۳	۰/۰۷۷^{ns}	۰/۰۷۵**	۰/۰۷۲^{ns}	۰/۱۶۶*	۰/۰۴۴**	۰/۰۲۵**
B×C	۶	۰/۸۵۸**	۰/۰۳۷**	۰/۰۱۱^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۵۳**	۰/۰۱۵**
A×B×C	۶	۱/۲۸۹**	۰/۱۳۳**	۰/۰۰۱۱^{ns}	۰/۱۲۹^{ns}	۰/۰۵۷**	۰/۰۳**
اشتباه آزمایشی	۴۸	۰/۰۵۱	۰/۰۰۱	۰/۰۶۳	۰/۰۴۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (٪)		۱۵/۸۹	۱/۸	۴/۸۲	۱۷/۴۲	۱۶	۲۳/۰۵

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ادامه جدول ۱- تجزیه واریانس آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز، طول ساقه، ساقه تا بنه و ریشه تحت تیمار کادمیوم و پلاسمای سرد اتمسفری در دو رقم گندم

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		سوپراکسید دیسموتاز	آسکوربات پراکسیداز	پلی‌فنول اکسیداز	طول ساقه	طول ساقه تا بنه	طول ریشه
تکرار	۳	۴۴۲۶۵**	۰/۰۵۳**	۰/۰۰۹**	۰/۰۹۱^{ns}	۲۰/۶۸^{ns}	۱۸/۵۷^{ns}
A (رقم)	۱	۵۹۸۵**	۰/۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۳۲**	۱۹۶/۰۲۱*	۲۰/۰۲۱^{ns}	۴۶/۰۲^{ns}
B (پلاسما)	۲	۹۸۲۸۳**	۰/۰۰۵*	۰/۰۰۷*	۴۲/۱۸۸^{ns}	۲۲/۶۸^{ns}	۱۸۰/۱۸**
A×B	۲	۱۹۷۶/۳**	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۷۶**	۷/۵۲۱^{ns}	۵۸/۵۲*	۲۲۱/۰۲۱**
C (کادمیوم)	۳	۵۳۵۸۱۵**	۰/۱**	۰/۰۲۱**	۸۷/۹۴*	۵۰/۰۸*	۱۰۶/۷۵*
A×C	۳	۴۰۳*	۰/۰۰۰۵^{ns}	۰/۰۶۷**	۷۹/۷۷^{ns}	۶۰/۳۳*	۳۲/۳۳^{ns}
B×C	۶	۱۶۹۴۱**	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۲۹**	۲/۴۳^{ns}	۳۲/۲۵^{ns}	۸۱/۲۵*
A×B×C	۶	۵۴۱/۸*	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۷**	۹/۷۷^{ns}	۴۴/۳۳^{ns}	۹۸/۵۸*
اشتباه آزمایشی	۴۸	۱۱۸/۴۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۲۷/۳۱۹	۱۵/۰۸	۲۲/۶۹
ضریب تغییرات (٪)		۰/۹۴	۸/۳۱	۳/۳۴	۱۲	۱۰/۲۱	۳۰

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

کریم تحت تیمار پلاسما ۶۰ و کادمیوم ۵۰ با میانگین ۰/۳۳۳ (تغییرات جذب بر دقیقه × میلی‌گرم پروتئین) بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را داشت و نسبت به سایر تیمارهای مورد ارزیابی اختلاف معنی‌داری را نشان داد (جدول ۲). یکی از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر سه جانبه فاکتور A×B×C برای صفات مورد ارزیابی صفات مورد ارزیابی

رقم	پلاسما	کادمیوم	قند محلول (mg/g)	پروتئین کل (mg/g)	پلی‌فنل اکسیداز (تغییرات جذب بر میلی‌گرم بر پروتئین)	سوپراکسید دیسموتاز (تغییرات جذب بر میلی‌گرم بر پروتئین)	کاتالاز (تغییرات جذب بر دقیقه× میلی‌گرم پروتئین)	متیونین (نانومول بر گرم)	طول ریشه (سانتی‌متر)
کریم	۶۰	شاهد	۱/۵۲ bc	۲/۳۰ b	۰/۹۴۲ cde	۱۲۵۰ c	۰/۲۳۳ b	۰/۰۵۷۰ b	۱۵/۲۰ bc
		۵۰	۱/۵۷ bc	۲/۳۵ a	۰/۹۴۵ cde	۱۴۵۰ a	۰/۳۳۳ a	۰/۰۵۷۸ b	۱۵/۲۵ bc
		۱۰۰	۱/۸۰۸ b	۲/۲۹۵ b	۰/۹۴ cde	۱۲۴۵ d	۰/۱۹۸ b	۰/۰۷۸۸ b	۱۱/۲۵ c
		۱۵۰	۱/۳۴۲ cd	۲/۰۹۵ d	۰/۸۵۸ e	۹۹۲/۳ g	۰/۱ c	۰/۱۰۲۳ b	۱۳/۲۵ bc
	۱۲۰	شاهد	۱/۱۰ de	۲/۰۸ d	۰/۶۵۴ f	۱۲۷۱ c	۰/۱۶۲ b	۰/۰۶۷۱ b	۱۴/۱۵ bc
		۵۰	۱/۱۵ de	۲/۰۸۵ d	۰/۶۵۸ f	۱۲۷۷ c	۰/۱۶۵ b	۰/۰۶۷۸ b	۱۴/۲۵ bc
		۱۰۰	۱/۲۰۲ de	۱/۷۰۵ f	۰/۹۲۸ de	۱۰۹۱ f	۰/۲۳۸ b	۰/۰۸۰۸ b	۱۵ bc
		۱۵۰	۰/۹۲ ef	۱/۷۵۳ e	۰/۸۷۳ e	۹۷۶ h	۰/۱۸۵ b	۰/۱۱۴۵ b	۱۱/۷۵ c
گنبد	۶۰	شاهد	۱/۶۲۲ bc	۱/۶۶ fg	۰/۸۸۱ e	۱۳۸۹ b	۰/۱۵ b	۰/۰۲۱ b	۱۸/۲۵ b
		۵۰	۱/۶۲۷ bc	۱/۶۶۵ fg	۰/۸۸۵ e	۱۳۹۰ b	۰/۱۸ b	۰/۰۲۴ b	۲۸/۲۵ a
		۱۰۰	۰/۷۶ f	۱/۶۲ g	۱/۰۹۵ a	۱۱۸۸ e	۰/۳۱۵ b	۰/۰۵۵۸ b	۱۸/۷۵ b
		۱۵۰	۱/۶۱ bc	۱/۵۶ h	۰/۹۹۳ bcd	۹۷۱/۵ hi	۰/۲۳۵ b	۰/۲۲ a	۱۱/۵ c
	۱۲۰	شاهد	۱/۵۶۰ bc	۲/۲ d	۱/۰۱۴ abc	۱۲۷۰ c	۰/۱۸۴ b	۰/۰۳۲۱ b	۱۱/۲ c
		۵۰	۱/۵۶۷ bc	۲/۱ d	۱/۰۱۷ abc	۱۲۷۷ c	۰/۱۸۸ b	۰/۰۳۲۸ b	۱۱/۵ c
		۱۰۰	۲/۲۸۷ a	۲/۲۱۵ c	۰/۹۳۳ cde	۱۰۸۲ f	۰/۲۰۵ b	۰/۰۸۳۳ b	۹/۷۵ c
		۱۵۰	۱/۲۰۵ de	۱/۶۸۸ f	۱/۰۵۸ ab	۹۵۷ i	۰/۲۳ b	۰/۰۷۳۳ b	۱۲/۷۵ bc
کریم			۰/۸۲ef	۲/۱۷۵ d	۰/۹۳۳ de	۱۱۶۹ e	۰/۲۳۸ b	۰/۰۸۰۸ b	۱۰/۵ c
گنبد			۰/۸۸ef	۱/۷ f	۱/۰۱۴ b	۱۰۸۲ f	۰/۲۳ b	۰/۰۲۴ b	۱۱/۳۳ c

وجود حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون دانکن در سطح ۵ درصد است.

راهکارهای کم کردن و از بین بردن انواع اکسیژن‌های فعال و جلوگیری از آسیب‌های اکسیداتیو در گیاهان، افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان همچون کاتالاز، سوپراکسیداز دیسموتاز و پراکسیداز است. با توجه به اینکه کاتالاز به حفظ هموستازی اکسیژن فعال در زمان تنش‌های زنده و غیرزنده کمک می‌کند، بنابراین فعالیت آن نیز در گیاه به هنگام تنش بیشتر خواهد شد (پورتبریزی و همکاران، ۱۳۹۶). عدم تعادل بین پراکسید هیدروژن تولیدی و القا شده موجب تجمع مقدار زیادی پراکسید هیدروژن در تیمارهای کادمیوم و وجود آنزیم‌هایی همچون کاتالاز و پراکسیداز از تجمع آن جلوگیری کرده و در نهایت تحمل گیاه نسبت به تنش را بیشتر می‌کنند (Zhang *et al.*, 2017). کاهش در فعالیت کاتالاز می‌تواند به عنوان یک پاسخ عمومی به تنش‌های محیطی باشد که این امر احتمالاً به علت بازدارندگی از سنتز آنزیم با تغییر در تجمع زیر واحدهای این آنزیم است (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵). Ling و همکاران (۲۰۱۵) در دو رقم کلزای حساس و مقاوم به تنش خشکی (تیمارها شامل آبیاری کامل، آبیاری کامل+پلاسما وتنش خشکی+ پلاسما) گزارش کردند که تیمار با پلاسمای سرد تحت تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز می‌شود. در آزمایشی که روی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

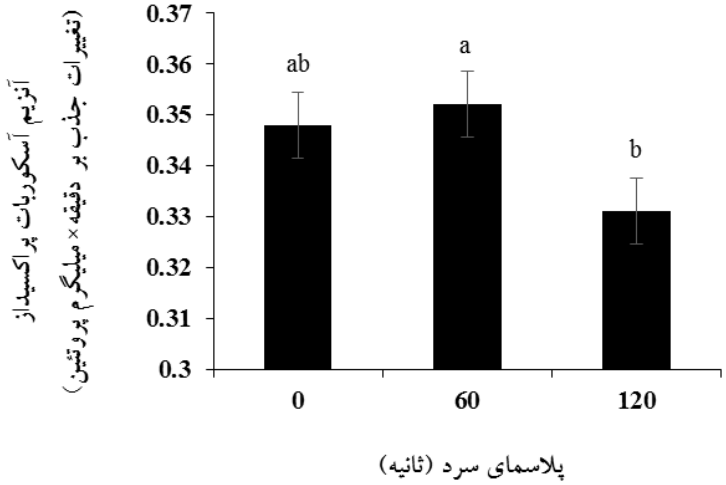
گیاه توت‌فرنگی صورت گرفت، نگهداری توت‌فرنگی در تیمار ۱۵ دقیقه با دمای ۶۰ کیلوولت باعث افزایش فنل کل و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت شد (Rana *et al.*, 2017). Zhang و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که آنزیم کاتالاز در گیاهان تحت تیمار با پلاسما در زمان‌های مختلف افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که تیمار پلاسمای سرد نقش مهمی در کاهش آسیب اکسیداتیو ایفا می‌کند و به حفظ شرایط نرمال کمک می‌کند تیمار سرد پلاسما نقش مهمی در کاهش آسیب اکسیداتیو ایفا می‌کند و به حفظ فعالیت‌های متابولیکی طبیعی فیزیولوژیکی کمک می‌کند (Zhang *et al.*, 2017).

آنزیم آسکوربات پراکسیداز: نتایج مقایسه اثرات ساده نشان داد که تیمار پلاسما ۶۰ با میانگین ۰/۳۵۲ (تغییرات جذب بر دقیقه × میلی‌گرم پروتئین) ۱/۱۴ درصد نسبت به تیمار شاهد (شکل ۱) و تیمار کادمیوم ۵۰ با میانگین ۰/۴۱۳ (تغییرات جذب بر دقیقه× میلی‌گرم پروتئین) (شکل ۲) بیشترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را به خود اختصاص دادند. Zhang و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاهان تحت تیمار با پلاسما در زمان‌های مختلف افزایش یافته است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت عدس نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم، میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در گیاهچه‌های عدس افزایش پیدا می‌کند (بارنده و کاوسی، ۱۳۹۵). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌توانند به‌عنوان سیستم دفاعی مهمی در گیاهان در قبال تنش‌های اکسیداتیو ایجاد شده به‌وسیله کادمیوم بررسی شوند. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به‌نوبه خود می‌توانند پراکسیداسیون چربی‌ها را به‌واسطه رادیکال‌های آزاد در طی سمیت کادمیوم کاهش دهد. هر چند این افزایش در غلظت‌های بیشتر از ۰/۵ میلی‌مولار مشهودتر بود. در این آزمایش با افزایش میزان کادمیوم در محیط، میزان فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیالیاز نیز افزایش نشان داد (بارنده و کاوسی، ۱۳۹۵).

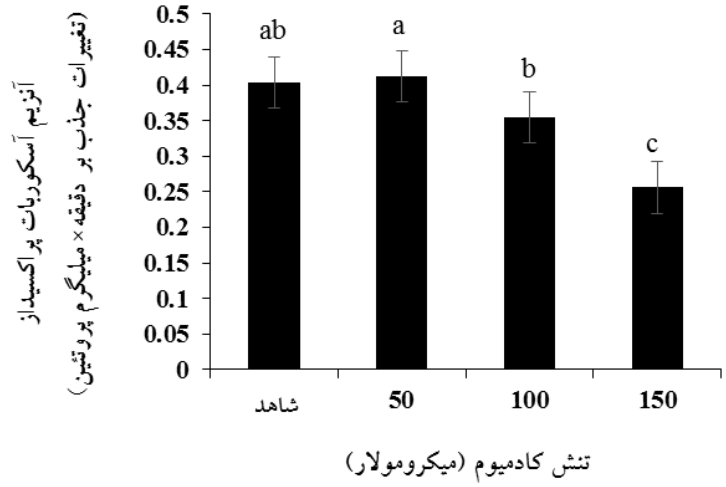
آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی و متقابل فاکتورها در مورد سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه اثرات سه جانبه نشان داد که (جدول ۲) در هر سه مرحله نمونه‌برداری رقم گندم کریم تحت تیمار پلاسما ۶۰ و کادمیوم ۵۰ به ترتیب با میانگین‌های ۱۶۰۵، ۱۴۵۶ و ۱۴۵۰ (تغییرات جذب بر دقیقه در میلی‌گرم بر پروتئین) بیشترین و ترکیب تیمار رقم گنبد در پلاسما ۱۲۰ در کادمیوم ۱۵۰ به ترتیب با میانگین‌های ۱۱۵۶، ۱۰۰۷ و ۹۵۷ (تغییرات جذب بر دقیقه در میلی‌گرم بر پروتئین) کمترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را به خود اختصاص دادند.آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌توانند رادیکال‌های آزاد اکسیژن را حذف کنند. از همین رو این آنزیم‌ها و بیان آن‌ها می‌توانند در پاسخ به سمیت کادمیوم اضافی تحریک شوند. این آنزیم‌ها برای رفع صدمات ناشی از تنش کادمیوم، افزایش می‌یابد و بنابراین گیاهانی که توانایی افزایش بیان و فعالین این آنزیم‌ها را دارند، متحمل به کادمیوم هستند (پوراکبر و همکاران، ۱۳۸۸).

پلی‌فنل اکسیداز: مطابق نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) اثرات اصلی و متقابل فاکتورها بر فعالیت پلی‌فنل اکسیداز معنی‌دار می‌باشد. نتایج مقایسه اثرات سه جانبه نشان داد که رقم گندم کریم در تیمار کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار و پلاسما ۶۰ ثانیه با میانگین ۰/۶۵۸ (تغییرات جذب بر میلی‌گرم بر پروتئین) بیشترین میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز و رقم گندم گنبد در تیمار کادمیوم ۱۰۰ و پلاسما ۶۰ با میانگین ۱/۰۹۵ (تغییرات جذب بر میلی‌گرم بر پروتئین) بیشترین میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز را به خود اختصاص دادند (جدول ۲). بیشترین فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز در تیمار با ۶۰ ثانیه و در زمان‌های مختلف قرارگیری در پلاسمای سرد مشاهده شد. بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در ۴۰ ثانیه قرارگیری در پلاسما حاصل گردید (نورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۸). در آزمایشی که بر گیاه توت‌فرنگی انجام شد، نگهداری توت-فرنگی در تیمار ۱۵ ثانیه با پلاسما باعث افزایش فنل کل و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت شد (Rana *et al.*, 2017). Ling و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که تیمار با پلاسمای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر پلاسمای سرد بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

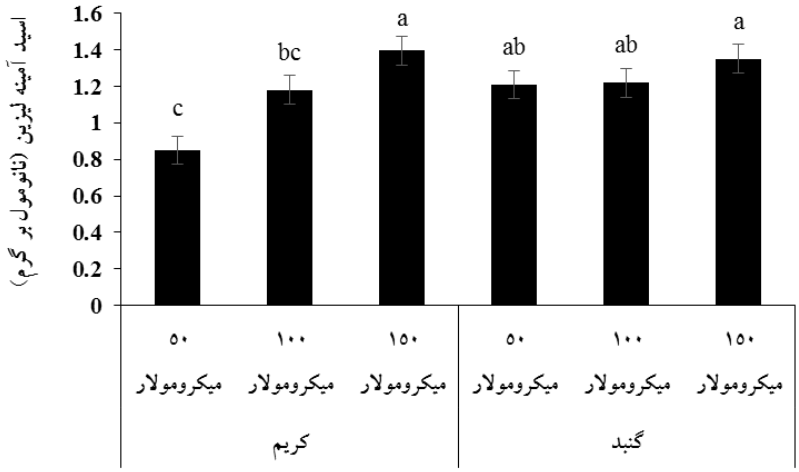


شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تنش کادمیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

سرد باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز می‌شود. Khan و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که تحت تنش کادمیوم، فعالیت آنزیم پراکسیداز در همه ارقام گندم مورد بررسی افزایش یافت. قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین، سیستم آنتی‌اکسیدانت را تحریک می‌کند، اما نحوه این پاسخ بسته به گونه گیاهی، فلزات به‌کار رفته و شدت تنش متفاوت است.

سنجش غلظت لیزین: مقایسه میانگین اثر دو جانبه فاکتور تنش کادمیوم× رقم برای صفت غلظت اسیدآمینه لیزین نشان داد که رقم گندم کریم در کادمیوم ۱۵۰ و رقم گنبد در کادمیوم ۱۵۰ به ترتیب با میانگین‌های ۱/۳۹۶ و ۱/۳۵۲ (نانومول بر گرم) بیشترین میزان اسیدآمینه لیزین را به خود اختصاص دادند. علاوه بر این رقم کریم در کادمیوم ۵۰ با میانگین ۰/۸۵ (نانومول بر گرم) کمترین میزان اسیدآمینه لیزین را به خود داشت (شکل ۳). لیزین اسیدآمینه ضروری بوده و به طور کارآمد در پاسخ به تنش و برخی از برنامه‌های تکاملی ابتدا به گلوتامات و سپس به سایر متابولیت‌های مرتبط با تنش تبدیل می‌شود (Nikolic *et al.*, 2014). لیزین پیش‌ماده اصلی سه متابولیت مهم مرتبط با تنش بوده که این سه متابولیت پرولین (Feizabadi *et al.*, 2021)، آمینو بوتریک اسید و آرژنین است

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تنش کادمیوم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در ارقام گندم. وجود حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون دانکن در سطح ۵ درصد است.

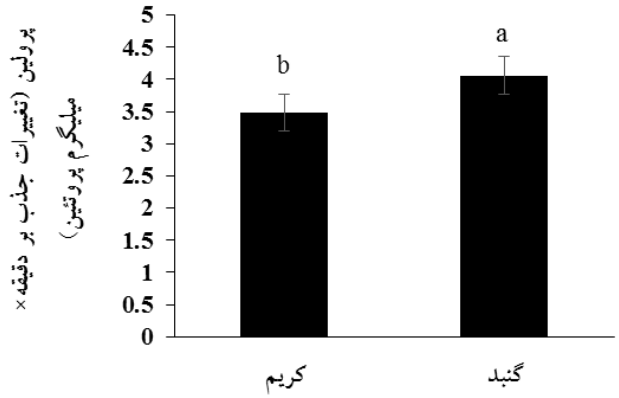
(Mickky *et al*., 2020). لیزین در تنظیم بازشدن روزنه‌های برگ، جوانه‌زنی دانه‌های گرده و سنتز کلروفیل کاربرد دارد و نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان به تنش ایفا می‌کند (Najafy, 2013). کاهش لیزین در رقم گندم کریم تحت تیمار کادمیوم ۵۰ احتمالاً می‌تواند به علت دخالت کادمیوم در فرایندهای تولید متابولیت‌های مقاومت به تنش از جمله پرولین باشد، ممکن است مواد حدواسط ایجادشده از کاتابولیسم این اسیدآمینه در سنتز پرولین استفاده شده و یا در تولید قندهای محلول دخالت داشته باشد.

سنجش غلظت متیونین: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بجز اثر اصلی رقم سایر فاکتورها بر غلظت اسیدآمینه متیونین معنی‌دار می‌باشد (جدول ۱). نتایج مقایسه اثرات سه جانبه نشان داد که رقم گندم گنبد در پلاسما ۶۰ و کادمیوم ۱۵۰ با میانگین ۰/۲۲ (نانومول بر گرم) بیشترین میزان اسیدآمینه متیونین را دارا بود (جدول ۲). احتمالاً کاهش این اسیدآمینه در رقم گنبد به علت وارد شدن آنها در فرایندهای تولید متابولیت‌های مقاومت به تنش از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و پرولین باشد. متیونین متابولیت اساسی در سلول‌های گیاهی است و صرف نظر از نقش آن به عنوان جزء اصلی پروتئین و نقش محوری آن در شروع ترجمه mRNA، به طور غیرمستقیم انواع فرآیندهای سلولی را از طریق پیش‌ماده S-Adenosyl Methionine تنظیم می‌کند (Joshi *et al*., 2010).

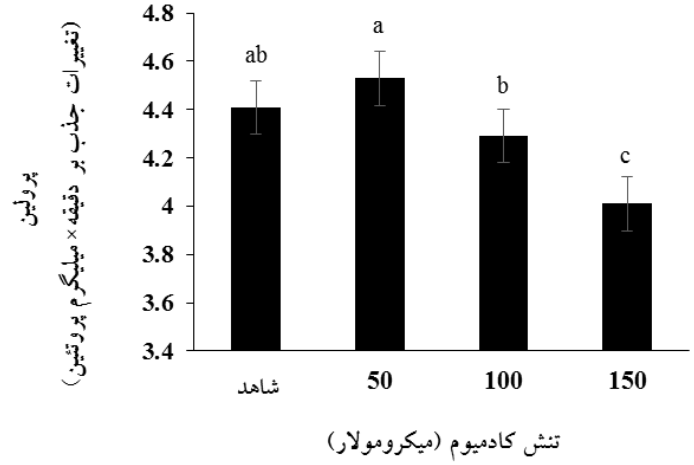
سنجش غلظت پرولین: نتایج مقایسه اثرات اصلی نشان داد که رقم گنبد با میانگین ۴/۰۶ تغییرات جذب بر میلی‌گرم پروتئین (شکل ۴) و تیمار کادمیوم ۵۰ با میانگین ۴/۵۳ تغییرات جذب بر میلی‌گرم پروتئین (شکل ۵) بیشترین میزان فعالیت آنزیم پرولین را به خود اختصاص دادند. پرولین یک آمینو اسید و یک ترکیب منحصر به فرد است که تجمع آن در تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی تحت تأثیر تنش گزارش شده است (El Rasafi *et al*., 2020)، همچنین گزارش شده است که پرولین یکی از عمومی‌ترین آمینواسیدهای گیاهی است که گیاه را تحت تنش‌های مختلف محافظت می‌کند (Mahmoudi *et al*., 2019). بیشترین میانگین مقدار پرولین مربوط به گیاهچه‌های حاصل از بذور رقم کویر تحت تنش ۱۵۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شد. افزایش میزان پرولین با افزایش غلظت کادمیم در گندم (Liu *et al*., 2020; Ozfidan-Konakci *et al*., 2018) گل گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis*) (Mahmoudi *et al*., 2019) و خیار (Semida *et al*., 2018) نیز گزارش شده است.

شاخص‌های رشد: نتایج مقایسه اثرات اصلی نشان داد که رقم گندم کریم با میانگین ۴۵/۵۸ سانتی‌متر (شکل ۶) و تیمار کادمیوم ۵۰ با میانگین ۴۶/۲۵ سانتی متر (شکل ۷) بیشترین

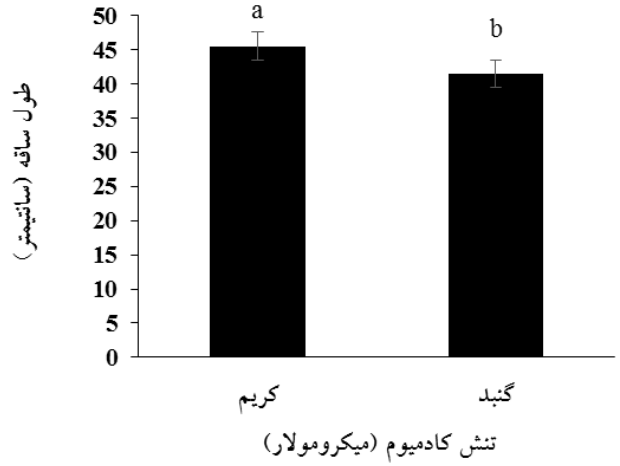
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر رقم بر پرولین



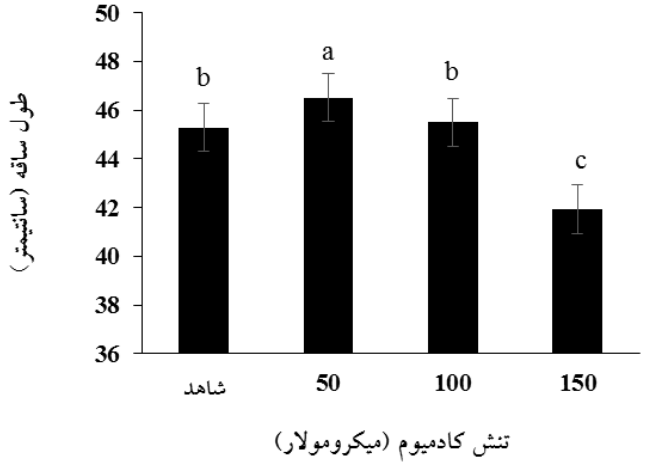
شکل ۵- مقایسه میانگین اثر تنش کادمیوم بر میزان پرولین



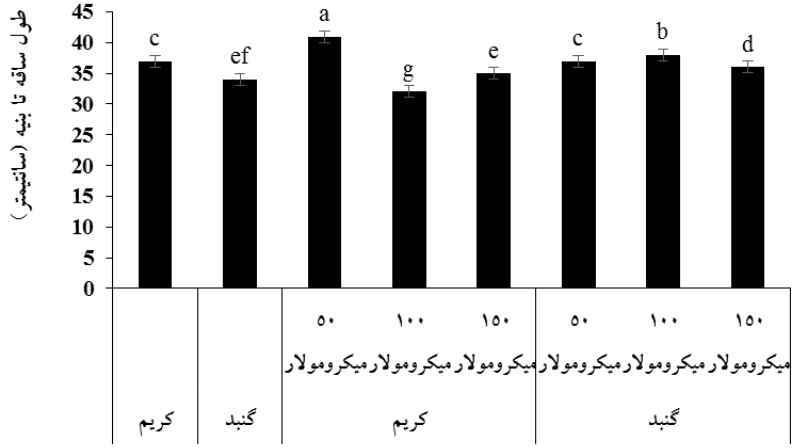
شکل ۶- مقایسه میانگین اثر رقم بر طول ساقه

طول ساقه را به خود اختصاص دادند. ترکیب کریم در کادمیوم ۵۰ با میانگین ۴۱ سانتی‌متر بیشترین طول ساقه تا بنه را داشتند

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر تنش کادمیوم بر طول ساقه



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر تنش کادمیوم بر طول ساقه تا بنه در ارقام گندم

جدول ۳- همبستگی بین صفات مورد ارزیابی

	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)
(۱) مقدار قندهای کل برگ	۱								
(۲) میزان پروتئین کل	۰/۴۲۶	۱							
(۳) آنزیم کاتالاز	-۰/۱۶۲	-۰/۳۶۷	۱						
(۴) سوپراکسید دیسموتاز	-۰/۲۹۶	۰/۰۳۷	۰/۴۴	۱					
(۵) پلی‌فنل اکسیداز	۰/۱۷۹	۰/۴۳۸	-۰/۱۶۴	۰/۲۴۶	۱				
(۶) سنجش غلظت متیونین	۰/۰۸۹	-۰/۳۸	۰/۱۲۵	۰/۰۰۶	-۰/۴۹۴	۱			
(۷) طول ساقه	۰/۱۴۲	۰/۶۸۶**	-۰/۵۰۳	۰/۱۹۵	۰/۵۳۸*	-۰/۰۵۹	۱		
(۸) طول ساقه تا بنه	۰/۴۵	۰/۶۲۹*	-۰/۴۵۶	-۰/۰۳۸	۰/۳۵۱	۰/۰۷۸	۰/۶۷**	۱	
(۹) طول ریشه	-۰/۱۴۶	-۰/۲۶	-۰/۲	-۰/۰۳۱	۰/۴۹۱	-۰/۲۹۳	-۰/۰۶	-۰/۲۷۳	۱

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

(شکل ۸). نتایج مقایسه اثرات سه جانبه (جدول ۲) طول ریشه نشان داد که ترکیب گنبد در پلاسما ۶۰ در کادمیوم ۵۰ با میانگین ۲۵/۲۸ سانتی‌متر بیشترین طول ریشه را دارا بود.

همبستگی بین صفات: نتایج همبستگی بین صفات نشان داد که (جدول ۳) رابطه بین میزان پروتئین کل با صفات طول ساقه (**۰/۶۸۶) و طول ساقه تا بنه (*۰/۶۲۹) مثبت و معنی‌دار بود. به عبارتی با افزایش طول ساقه و طول ساقه تا بنه میزان پروتئین کل گیاه هم افزایش یافت. همچنین رابطه بین پلی‌فنل اکسیداز با طول ساقه (*۰/۵۳۸) مثبت و معنی‌دار بود. بین طول ساقه و طول ساقه تا بنه نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده گردید.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی از نتایج حاصل چنین استنباط می‌شود که تنش ناشی از افزایش غلظت کادمیوم و پلاسما بر فرآیندهای فیزیولوژیک گندم متفاوت بوده و هر دو رقم از مکانیسم‌های متفاوتی برای مقابله با تنش کادمیوم استفاده می‌کنند. ارقام گندم کریم و گنبد به منظور سازگاری و تحمل بیشتر در جهت مقابله با توسعه و تجمع غلظت‌های مسموم‌کننده این فلز سنگین در شرایط تنش تمام انرژی خود را صرف سنتز عوامل دخیل در مکانیسم دفاعی می‌کنند. کاهش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند باعث تولید و تجمع گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر شود و با ایجاد تنش اکسیداتیو، تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی و رشد را مهار کند. نتایج بررسی دو رقم نشان داد که با افزایش غلظت کلرید کادمیوم میزان آنزیم کاتالاز، پلی‌فنل اکسیداز، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در رقم کریم کاهش یابد و در مقابل بر مقدار قند محلول، پروتئین کل، لیزین و متیونین افزوده شد. همچنین در رقم گنبد با افزایش غلظت کلرید کادمیوم میزان پروتئین کل، آنزیم پلی‌فنل اکسیداز، آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز کاهش یافت که نشان از آثار سمیت کادمیوم و تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌باشد که که آسیب‌های اکسیداتیو و کاهش رشد را دنبال داشت و مقدار قند محلول آنزیم کاتالاز، مقدار لیزین و متیونین افزایش یافت. به‌طورکلی در این آزمایش رقم گندم کریم به تنش کادمیوم متحمل‌تر از رقم گنبد بود.

منابع

بارنده، فاطمه، و کاوسی، حمیدرضا (۱۳۹۵). اثر کادمیوم بر تغییرات برخی اجزاء سیستم دفاع آنتی‌اکسیدان آنزیمی و غیرآنزیمی در گیاهچه‌های عدس. *نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران*، ۷، ۱۳۷-۱۲۵. doi: 10.22067/ijpr.v7i2.45542

بهنام، آزیتا، عباسپور، حسین، صفی‌پور افشار، اکبر، و سعید نعمت‌پور، فاطمه (۱۳۹۸). اثر سالیسیلیک اسید بر بهبود رشد و تغییر پارامترهای بیوشیمیایی دانه‌رست‌های گندم تحت تنش کادمیوم. *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۲، ۱۳-۱. 20.1001.1.23832592.1398.32.2.1.6

پوراکبر، لطیفه، و اشرفی یورقانلو، رقیه (۱۳۸۸). اثر کادمیوم بر میزان تولید هیدروژن پراکسید و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه ذرت (*Zea mays* L.). *نشریه علوم (دانشگاه خوارزمی)*، ۹، ۴۷۳-۴۸۴. URL: http://jsci.khu.ac.ir/article-۱-۱۳۴۶-fa.html

پورتبریزی، ثریا، پورسیدی، شهرام، عبدالشاهی، روح‌اله، و نادرنژاد، نازی (۱۳۹۶). اثر تنش فلز کادمیوم بر الگوی بیان ژن و فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز در گیاه مارتیغال. *مجله بیوتکنولوژی کشاورزی*، ۹، ۵۰-۴۰. https://civilica.com/doc/864854

نورمحمدی، زهرا، محمدزاده شهیر، مهنوش، فهمی، دنیا، اطیایی، سیدمحمد، و فراهانی، فرح (۱۳۹۸). القای تغییرات ژنتیکی و مورفولوژیکی در کاتارانتوس رزئوس توسط پلاسمای اتمسفری سرد. *یافته‌های نوین در علوم زیستی*، ۶، ۳۱۰-۳۰۲. http://nbr.khu.ac.ir/browse.php?a_code=A-10-183-5&slc_lang=en&sid=1

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

هاشمی، فهیمه، کاوسی، حمیدرضا، و پورسیدی، شهرام (۱۳۹۵). اثر سمیت کادمیوم بر الگوی بیان ژن و فعالیت آنزیمی سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در گیاهچه‌های نخود (*Cicer arietinum* L.). *مجله بیوتکنولوژی کشاورزی*، ۸، ۱۱۱-۹۹. doI: 10.22103/jab.2017.1636

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F., & Ok, Y. S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicol Environ Saf*, *140*, 37-47. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.028

Agrawal, B., Czymmek, K. J., Sparks, D. L., & Bais, H. P. (2013). Transient influx of nickel in root mitochondria modulates organic acid and reactive oxygen species production in nicke hyper accumulator *Alyssum murale*. *Journal of Biological Chemistry*, *288*, 7351-7362. doi: 10.1074/jbc.M112.406645

Ahakpaz, F., Majidi Heravan, E., Roostaei, M., Bihamta, M., & Mohammadi, S. (2020). Evaluation of rain-fed wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 9, 28-40. 10.30479/ijgpb.2020.12734.1265

Ahmad, P., Azooz, M. M., & Prasad, M. N. V. (2013). Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress. Published by Springer.

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bradford, M. M. (1976). Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein- dye binding. *Journal of Analal Biochem*, *72*, 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Bubler, S., Ehlbeck, J., & Schluter, O. K. (2016). Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: Impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.007

Chance, B, & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidase. *Journal of Methods Enzymol*, *2*, 764-775. https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14

Cheng, S, & Huang, C. (2006). Influence of cadmium on growth of root vegetable and accumulation of cadmium in the edible root. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 3, 243-252. https://doi.org/10.6703/IJASE.2006.4(3).243

El Rasafi, T., Oukarroum, A., Haddioui, A., Song, H., Kwon, E. E., Bolan, N., & Rinklebe, J. (2020). Cadmium stress in plants: A critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies. *Crit Rev Environ Science Technology*, 1-52. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835435

Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, Kh. M. (2012). Drought stress in plants: An overview. *In Plant Responses to Drought Stress*, 1-33. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1

Feizabadi, A., Noormohammadi, G., & Fatehi, F. (2021). Changes in growth, physiology, and fatty acid profile of rapeseed cultivars treated with vermicompost under drought stress. *Journal Soil Science Plant Nutrcher*, *21*(1), 200-208. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00353-4

Foyer, C. H, & Noctor, G. (2005). Redox homeostasis and antioxidant signaling: A metabolic interface stress perception and physiological responses. *The Plant Cell*, *17*(7), 1866-1875. DOI: 10.1105/tpc.105.033589

Goncalvez, J., Beker, A., Cargnelutti, D., Tabaldi, L., Pereira, L., Battisti, V., Spanevello, R., Morsch, V., Nicoloso, F., & Schetinger, M. (2007). Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedling. *Brazilian Journal Plant Physiology*, 19, 223-232.

Graves, D. B. (2012). Low temperature plasma biomedicine. *Journal of Physics*, 19, 40-48. https://doi.org/10.1063/1.4892534

Henselova, M., Slovakova, L., Martinka, M., & Zahoranova, A. (2012). Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma. *Biologia*, *67*, 490-497. https://doi.org/10.2478/s11756-012-0046-5

Hirayama, T, & Shinozaki, K. (2010). Research on plant abiotic stress responses in the post-genome era: past, present and future. *The Plant Journal*, *61*, 1041-1052. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04124.x

International Seed Testing Association (ISTA). (2017). International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland. (Handbook)

Iranbakhsh, A., Ardebili, Z. O., Ardebili, N. O., Ghoranneviss, M., & Safari, N. (2018). Cold plasma relieved toxicity signs of nano zinc oxide in *Capsicum annuum* cayenne via modifying growth, differentiation, and physiology. *Acta Physiology Plant*, *40*(8), 1-11.

Jacobsen, S. E., Jensen, C. R., & Liu, F. (2012). Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crops Research*, *128*, 34-47.

Joshi, V., Joung, J. G., Fei, Z., & Jander, G. (2010). Interdependence of threonine, methionine and isoleucine metabolism in plants: Accumulation and transcriptional regulation under abiotic stress. *Amino Acid*, *39*(4), 933-947.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

Juknys, R., Vitkauskaite, G., Racaite, M., & Vencloviene, J. (2012). The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of spring barley. *Central European Journal of Biology*, 7, 299-306.

Kar, M, & Mishra, D. (1976). Catalase, peroxidase and polyphenol oxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, *57*, 315-319.

Khan, N., Samiullah, A., Singh, S., & Nazar, R. (2007). Activities of antioxidative enzymes, sulphur assimilation, photosynthetic activity and growth of wheat (*Triticum aestivum*) cultivars differing in yield potential under cadmium stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193, 435-444.

Lange, B., van der Ent, A., Baker, A. J. M., Echevarria, G., Mahy, G., & Malaisse, F. (2017). Copper and cobalt accumulation in plants: A critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytologist, 213*, 537-551.

Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Chunlei, Z., & Yuanhua, D. (2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Science Report*, *5*(1), 1-10.

Ling, L., Jiafeng, J., Jiangang, L., Minchong, S., Xin, H., Hanliang, S., & Yuanhua, D. (2014). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Scientific Reports*, *4*, 5859.

Ling, L., Jiangang, L., Minchong, Sh., Jinfeng, H., Hanliang, Sh., Yuanhua, D., & Jiafeng, J. (2016). Improving seed germination and peanut yields by cold plasma treatment. *Plasma Science Technology*, *18*, 1027-1033.

Liu, Y. M., Liu, D. Y., Zhang, W., Chen, X. X., Zhao, Q. Y., Chen, X. P., & Zou, C. Q. (2020). Health risk assessment of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb, As and Cr) in wheat grain receiving repeated Zn fertilizers. *Environ Pollut*, *257*, 113581.

Loka, D., Harper, J., Humphreys, M., Gasior, D., Gwynn-Jones, D., Scullion, J., Doonan, J., Kingston-Smith, A., Dodd, R., Wang, J., Chadwick, D., Hill, P., Jones, D., Mills, G., Hayes, F., & Robinson, D. (2018). Impacts of abiotic stresses on the physiology and metabolism of cool-season grasses: A review. *Food and Energy Security*.

Losak, T., Hlusek, J., Filipcik, R., Pospisilova, L., Manasek, J., Prokes, K., & Orosz, F. (2010). Effect of nitrogen fertilization on metabolisms of essential and non-essential amino acids in field-grown grain maize (*Zea mays* L.). *Plant, Soil and Environment*, *56*(12), 574-579.

Mahmoudi, F., Sheikhzadeh Mosaddegh, P., Zare, N., & Esmaielpour, B. (2019). Improvement of seed germination, growth and biochemical characteristics of Borage (*Borago officinalis* L.) seedlings with seed priming under cadmium stress conditions. *Iranian Journal of Plant Biology*, *11*(1), *23-42.*

Mahmoudi, F., Sheikhzadeh Mosaddegh, P., Zare, N., & Esmaielpour, B. (2017). The effect of hydropriming on germination, growth and antioxidant enzymes activity of borage (*Borago officinalis* L.) seedling under cadmium stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *48*(1), 253-266.

Meng, Y., Qu, G., Wang, T., Sun, Q., Liang, D., & Hu, Sh. (2017). Enhancement of germination and seedling growth of wheat seed using dielectric barrier discharge plasma with various gas sources. *Plasma Chemistry Plasma Processing*, *37*, 1105-1119. 10.1007/s11090-017-9799-5

Mickky, B., Aldesuquy, H., & Elnajar, M. (2020). Effect of drought on yield of ten wheat cultivars linked with their flag leaf water status, fatty acid profile and shoot vigor at heading. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *26*(6), 1111.

Mora, F., Quitral, Y. A., Matus, I., Russel, J., Waugh, R., & del Pozo, A. (2016). SNP-based QTL mapping of 15 complex traits in barley under rain-fed and well-watered conditions by a mixed modeling approach. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 909.

Najafy, M. (2013). The role of aminoacids in organic farming. http :// www .talfighdaneh.ir /News/ post-23550.

Nikolic, N., Borisev, M., Pajevic, S., Zupunski, M., Topic, M., & Arsenov, D. (2014). Responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) plants to cadmium toxicity in relation to magnesium nutrition. *Acta Bot Croat, 73*(2), 359-373. from https://www.abc.botanic.hr/index.php/abc/article/view/980

Omokolo, N. D., Tsala, N. G., & Djocgoue, P. F. (1996). Changes in carbohydrate, amino acid and phenol content in cocoa pods from three clones after infection with *Phytophthora megakarya* Bra. and Grif. *Journal of Annul Botany London, 77*, 153-158.

Ozfidan-Konakci, C., Yildiztugay, E., Bahtiyar, M., & Kucukoduk, M. (2018). The humic acid-induced changes in the water status, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense systems of wheat leaves with cadmium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 155*, 66-75.

Rana, S., Mehta, D., Bansal, V., Shivhare, U. S., & Yadav, S. K. (2017). Atmospheric cold plasma (ACP) treatment improved in-package shelf-life of strawberry fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 1-11.

Sadeghi, F., Rezeizad, A., & Rahimi, M. (2021). Effect of zinc and magnesium fertilizers on the yield and some characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds in two years. *International Journal of Agronomy*, 6.

Sadhu, S., Thirumdas, R., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate*), LWT - *Food Science and Technology*.

Semida, W. M., Hemida, K. A., & Rady, M. M. (2018). Sequenced ascorbate-proline-glutathione seed treatment elevates cadmium tolerance in cucumber transplants. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 154*, 171-179.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

Singhal, P., Jan, A. T., Azam, M., & Haq, Q. M. R. (2016). Plant abiotic stress a prospective strategy of exploiting promoters as alternative to overcome the escalating burden. *Frontiers in Life Science*, *9*(1), 52-63.

Sivachandiran, L, & Khacef, A. (2017). Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment-RSC. *Advances*, *7*, 1822-1832.

Souza, A. D., Garcıa, D., Sueiro, L., & Gilart, F. (2014). Improvement of the seed germination, growth and yield of onion plants by extremely low frequency non-uniform magnetic fields. *Scientia Horticulturae*, *176*, 63-69.

Tolcin, A. C. (2009). Mineral resource of the month: Zinc. *Earth Sciences Museum*, *54*, 29.

Tolouie, H., Hashemi, M., Mohammadifar, M. A., & Ghomi, H. (2017). Cold atmospheric plasma manipulation of proteins in food systems. Critical reviews in food science and nutrition. *In Press Accepted Manuscript*.

Tong, J., He, R., Zhang, X., Zhan, R., Chen, W., & Yang, S. (2014). Effects of atmospheric pressure air plasma pre-treatment on the seed germination and early growth of *Andrographis paniculata*, *Plasma Science and Technology*, *16* (3).

Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere, 254*, 126791.

Wangstrand, H., Eriksson, J., & Born, I. O. (2007). Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, *26*, 209-214.

Zhang, J. J., Oh Jo, J., Huynh, D. L., Kumar, Mongre, R., Ghosh, M., Singh, A., Lee, S. B., Sun Mok, Y., Hyuk, P., & Jeong, D. K. (2017). Growth-inducing effects of argon plasma on soybean sprouts via the regulation of demethylation levels of energy metabolism-related genes. *Scientific Reports*, *7*, 41917.

Zhao, Y., Peralta-Videa, J. R., Lopez-Moreno, M. L., Ren, M., Saupe, G., & Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Kinetin increases chromium absorption, modulates iths distribution, and changes the activity of catalase and ascorbate peroxidase in Mexican Palo Verde. *Environmental Science and Technology*, *45*, 1082-1087.

Zhu, J. K. (2016). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell, 167*(2), 313-324.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]

Effect of atmospheric cold plasma and cadmium stress on biochemical properties and activity of antioxidant enzymes in wheat plant

Nasim Ghasemzadeh[1], Alireza Iranbakhsh*[1], Zahra Oraghi-Ardebili[2], Sara Saadatmand[1], Sodabeh Jahanbakhsh-Godehkahriz[3]

[1] Department of Biology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Department of Biology, Garmssar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran
[3] Department of Agronomy and plant breeding, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Received: 2023/05/09, Accepted: 2023/08/22)

Abstract

Heavy metals are one of the most important environmental problems and have caused many concerns due to their carcinogenic properties, non-renewability and biological accumulation. Considering the expansion of lands contaminated with heavy metals and the inevitable cultivation of strategic grains such as wheat in these lands and the fact that according to research wheat accumulates more cadmium than other grains, therefore the purpose of this research is to investigate the effect of plasma Atmospheric cold and cadmium were on the activity levels of antioxidant enzymes, proline and the amount of protein and soluble sugars on two cultivars Karim and Gonbad. This experiment was carried out in a factorial form in a completely randomized design with four replications in the greenhouse of Mohaghegh Ardabili University. Factors included wheat cultivars (susceptible cultivar Gombad and resistant cultivar Karim), atmospheric cold plasma at three levels (control, 60 and 120 seconds) and treatment with cadmium metal at four levels (control, 50, 100 and 150 µM). The results showed that the amount of soluble sugar, protein, methionine amino acid concentration, catalase and superoxide dismutase enzymes, and root length were affected by the cultivar × plasma × cadmium interaction. The results of the comparison of three-way effects showed that Gombad wheat cultivar had the highest amount of methionine amino acid in plasma 60 and cadmium 150 with an average of 0.22 (nanmol/g). In general, it can be concluded from the results that the stress caused by the increase of cadmium and plasma concentration on the physiological processes of wheat is different and both cultivars use different mechanisms to deal with cadmium stress. Kareem and Gonbad wheat cultivars spend all their energy in the synthesis of factors involved in the defense mechanism in order to adapt and bear more in order to deal with the development and accumulation of toxic concentrations of this heavy metal in stress conditions. The results of the evaluation of cultivars showed that with the increase in the concentration of cadmium chloride, the amount of catalase, polyphenol oxidase, superoxide dismutase and ascorbate peroxidase decreased and the amount of soluble sugar, total protein, lysine and methionine increased. Also, in Gonbad variety, with the increase in the concentration of cadmium chloride, the amount of total protein, polyphenol oxidase enzyme, superoxide dismutase enzyme and ascorbate-peroxidase decreased, which shows the effects of cadmium toxicity and the production of oxygen free radicals. As a result, it follows oxidative damage and growth reduction, and the amount of soluble sugar of catalase enzyme, the amount of lysine and methionine increased. Also, Karim cultivar is more tolerant to cadmium stress than Gonbad cultivar. Therefore, this research showed that cadmium treatment at 150 micromolar in the presence of cold plasma was able to stimulate the defense mechanisms of the plant and make the plant bear the stress.

Key words: Plasma, Superoxide dismutase, Cadmium, Wheat

Corresponding author, Email: tbarzegar@znu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-16]