فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۲، شماره ۵۷، آذر و دی‌ماه ۱۴۰۲ صفحه: ۱۹-۳۵
https://doi.org/10.22034/12.57.19

مقاله پژوهشی

ارزیابی صفات مهم فیزیولوژیکی ارقام مروارید و فلات گندم نان تحت فلزات سنگین کادمیوم و جیوه

سدابه جهانبخش گده کهریز* و سیده یلدا رئیسی ساداتی

گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴)

چکیده

آلودگی محیطی ناشی از فلزات سنگین به‌دلیل تجزیه‌ناپذیری یک نگرانی اصلی در خاک‌های کشاورزی است که امنیت غذایی را تهدید می‌کند. کادمیوم و جیوه از جمله دو آلاینده خطرناک و سرطان‌زا به شمار می‌روند که در اکوسیستم‌های طبیعی میزان آن توسط فعالیت‌های انسانی افزایش یافته و منجر به کاهش تولید پروتئین، غیرفعال‌سازی برخی از آنزیم‌ها، ایجاد اختلال در انواع واکنش‌ها و اعمال سلولی و باعث توقف رشد و نمو می‌شوند. از آنجایی‌که آلوده‌شدن زمین‌های زراعی با فلزات سنگین از یک طرف منجر به کاهش کیفیت محصولات کشاورزی و از طرف دیگر تهدیدی جدی برای سلامت انسان است، نیازمند توجه بیشتری است. لذا هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر کشت مجدد بذور گندم حاصل از تیمار فلزات سنگین کادمیوم و جیوه بر برخی پارامترهای مورفوفیزیولوژیکی دو رقم گندم است. بدین منظور آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. فاکتور اول ارقام گندم (مروارید و فلات) و فاکتور دوم تیمارهای آزمایشی شامل کلرید جیوه (با غلظت ۱۰ و ۲۰ میکرومولار)، کلرید کادمیوم (۰/۵ میلی-مولار) و برهمکنش کادمیوم با جیوه در دو سطح (۱۰ میکرومولار جیوه با ۰/۵ میلی‌مولار کادمیوم، ۲۰ میکرومولار جیوه با ۰/۵ میلی‌مولار کادمیوم) همراه با گیاه‌چه‌های شاهد بودند. یافته‌ها نشان داد که تحت تنش فلز سمی جیوه و برهمکنش کادمیوم با جیوه میزان قند محلول و پروتئین کل، فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش یافته اما از فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز در رقم فلات کاسته شد. نتایج بیانگر آن است که بذور حاصل از تیمار برگی کادمیوم، جیوه و برهمکنش این فلزات سنگین و کشت مجدد این بذور می‌تواند با تغییر در ویژگی‌های فیزیولوژیک بر عملکرد خود تأثیر بگذارد. به‌طور کلی رقم مروارید تحت تنش کلرید جیوه و کلرید کادمیوم و برهم‌کنش آن‌ها، واکنش بهتری نسبت به رقم فلات از خود نشان داد. بنابراین براساس نتایج این آزمایش گلخانه‌ای تداوم تحقیقات در شرایط مزرعه ضروری به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، کلرید جیوه، کادمیوم، گندم، عملکرد

مقدمه

گندم نان از مهم‌ترین غلات در سطح جهان و نیز در ایران به‌شمار می‌رود. و حدود ۲۰ درصد از اراضی جهان و از مجموع اراضی زیرکشت ایران، ۶/۷۰ میلیون هکتار به کشت این گیاه راهبردی اختصاص یافته است (FAO, 2019; Alipour *et al*., 2019). تنش‌های غیرزیستی از جمله فلزات

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: jahanbakhsh@uma.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

سنگین باعث ایجاد خسارات زیادی به گندم می‌شوند، صنعتی شدن جوامع باعث آزادسازی ترکیبات سمی زیادی در بیوسفر شده است. آلاینده‌های فلزی به‌دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثارفیزیولوژیک آن‌ها بر موجودات زنده و انسان، حتی در غلظت‌های کم سرطان‌زا هستند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). هر چند برخی فلزات سنگین در مقادیر خیلی کم برای انجام متابولیسم طبیعی، برای بدن انسان ضروری هستند ولی به‌طور عمده مقادیر زیاد آن‌ها برای انسان سمی محسوب می‌شود. اثر سمی مقادیر بالای فلزات سنگین در گیاهان نیز دیده می‌شود. یکی از ویژگی‌های خاص فلزات سنگین که در بروز اثرات سمی آن‌ها نقش مهمی دارد، خاصیت انباشتگی زیستی فلزات سنگین است (Eskandari, 2015). غلظت بالای فلزات سنگین باعث ایجاد اختلال در فرآیندهای متابولیکی رشد گیاهان شده و حتی باعث مرگ آن‌ها می‌شود (وجودی مهربانی و همکاران، ۱۳۹۸). وجود سطوح بالای فلزات سنگین در محیط‌زیست به دلیل مسمومیت، تمایل به تجمع زیستی و ماندگاری بسیار زیاد آن‌ها در اکوسیستم، تهدیدی بالقوه برای سلامت انسان و موجودات زنده است. فلزات سنگین غیرضروری مانند جیوه، کادمیوم، آرسنیک و سرب حتی در مقادیر بسیار کم باعث مسمومیت شدید موجودات زنده می‌شوند (Shahid *et al.*, 2015). تحقیقات اخیر نشان داده است که فلزات سنگین علاوه بر جذب ریشه می‌توانند از طریق مسیر برگی نیز به گیاهان وارد شوند (Xiong *et al.*, 2017; Shahid *et al.*, 2020). فلز جذب شده از مسیر برگی پس از آزاد شدن در آبکش، می‌تواند در سراسر گیاه توزیع شود (Shahid *et al.*, 2020). مشکل اصلی مربوط به فلزات سنگین آن است که این آلاینده‌های غیرآلی برخلاف آلاینده‌های آلی تجزیه‌پذیر نیستند. این واقعیت، فلزات سنگین را به یکی از خطرناک‌ترین گروه آلاینده‌های زیست‌محیطی تبدیل کرده است (Vodyanitskii, 2016). بنابراین، حذف و یا حداقل کاهش غلظت آن‌ها از سیستم‌های زراعی به‌طور تنگاتنگی با سلامتی انسان در ارتباط است (Amouie *et al.*, 2012). فلزات سنگین موجب اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی گیاهان می‌شوند (Alahbakhsh *et al.*, 2018). فلزات سنگین در محیط‌زیست سبب ایجاد تغییرات فیزیولوژیک در گیاهان می‌شوند و می‌توانند موجب کاهش قدرت جوانه‌زنی و رشد گیاه و در غلظت‌های بالا سبب از بین‌رفتن گیاه می‌شوند. گیاهان حساس در چنین شرایطی آسیب می‌بینند و از بین می‌روند، درحالی‌که گیاهان مقاوم همچنان به تولیدمثل و رشد خود ادامه می‌دهند (Sobral- Souza *et al.*, 2014). قرارگرفتن گیاهان در معرض فلزات سنگین ممکن است منجر به اثرات سمی بر فاکتورهای رشد مانند کاهش ارتفاع گیاه، طول ریشه، وزن تر و وزن خشک شود، اگر چه میزان این تأثیرات به گونه گیاهی، ژنوتیپ و همچنین بافت گیاهی بستگی دارد. صفات رشد، به‌عنوان پارامترهای بسیار حساسی در نظر گرفته می‌شوند که شاخصی برای اندازه‌گیری پاسخ گیاهان در برابر سمیت فلزات است (Imtiaz *et al.*, 2015). جیوه به‌عنوان یک عنصر فلزی سنگین، در آلودگی محیط و ایجاد سمیت و تنش در موجودات زنده نقش دارد. جیوه با تجمع در خاک و جذب به‌وسیله گیاه به زنجیره غذایی وارد می‌شود و مسمومیت‌هایی را در گیاهان و افراد تغذیه‌کننده به وجود می‌آورد (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). این عنصر سمی با تجمع در دیواره سلولی و ورود به سیتوپلاسم، موجب تنش اکسیداتیو می‌شود و به‌دنبال آن، رادیکال‌های فعال اکسیژن (ROS) در گیاهان تولید می‌شود (Zhou *et al.*, 2008). این گونه‌های فعال اکسیژن بسیار واکنش‌گر و سمی هستند و در غیاب یک سازوکار محافظتی قوی می‌توانند به ساختار لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک صدمه بزنند، بنابراین با ایجاد تنش اکسیداتیو و آسیب به سلول‌های گیاهی، رشد گیاه کاهش می‌یابد (Hasanuzzaman *et al.*, 2018). زیادشدن جیوه در محیط رشد گیاه و سمیت این فلز، موجب کاهش پتانسیل آبی، توقف رشد ریشه و ساقه، اختلال در تغذیه گیاه، تغییر در تراوایی غشای سلولی، کاهش در تولید پروتئین و جوانه‌زنی می‌شود (Zhou *et al.*, 2008). کادمیوم عنصری سمی برای گیاهان است که از طریق فعالیت‌های مختلف بشر وارد خاک می‌شود (قربان‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). در بین فلزات سنگین، فلز

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

کادمیوم به دلیل تحرک و پویایی زیاد در خاک و جذب توسط گیاه، دارای اهمیت خاصی است (Khatamipour *et al.*, 2011). کادمیوم یکی از سمی‌ترین فلزات است که می‌تواند از همان ابتدای چرخه حیات گیاهان، یعنی جوانه‌زنی بذر تا تولید دانه‌ها، روی گیاهان تأثیر بگذارد. در نتیجه غلظت بیش از حد کادمیوم واکنش‌های متابولیکی گیاهان به‌دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن آسیب می‌بیند (Nazar *et al.*, 2012). تنش اکسیداتیو مرتبط با تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن در برگ‌های گیاه می‌تواند منجر به کاهش فعالیت فتوسنتزی، آسیب به DNA و RNA، اکسیداسیون پروتئین‌ها و پراکسیداسیون لیپیدها شود (Abbas *et al.*, 2018; Shahid *et al.*, 2019). انباشتگی کادمیوم سبب تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و ساختاری بسیاری نظیر عدم تعادل آب، مهار جوانه‌زنی، مهار فتوسنتز، کاهش رشد به‌ویژه رشد ریشه، اختلال در تغذیه معدنی و متابولیسم قند در گیاه شده و بنابراین به شدت روی تولید زیست‌توده تأثیر گذاشته و در نهایت می‌تواند سبب مرگ گیاه شود (Alahbakhsh *et al.*, 2018). سمیت کادمیوم در اثر افزایش این عنصر به محیط رشد گیاه به شکل‌های مختلف دیده شده است که شامل کاهش عملکرد، کاهش رشد ریشه و برگ، بازدارندگی فعالیت برخی آنزیم‌ها، تولید موتاژن‌ها، کاهش سطح برگ و ماده خشک گیاه می‌شود (پورتبریزی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین کادمیوم در غلظت‌های بالاتر از ۵ تا ۱۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک برگ می‌تواند منجر به مرگ گیاه شود (White and Brown, 2010). یکی دیگر از اثرهای بعدی سمیت کادمیوم در گیاهان، القای تنش اکسیداتیو است، که موجب تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن، مهار فعالیت آنزیم روبیسکو، جذب نیتروژن و سولفات می‌شود (Nourbakhsh Rezaei *et al.*, 2019). گیاهان سازوکارهای مختلفی برای کاهش آثار زیان‌بار رادیکال‌های آزاد اکسیژن دارند که از جمله این سازوکارها، تولید ترکیبات آنزیمی و غیرآنزیمی است. اجزای آنزیمی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی شامل آنزیم‌هایی مانند آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز هستند (Mishra *et al.*, 2009; Sharma *et al.*, 2012). یکی از دلایل کاهش رشد و عملکرد گیاهان تحت تنش کادمیوم می‌تواند به کاهش فتوسنتز مربوط باشد. در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است که سمیت کادمیوم موجب تغییر در ساختارهای فتوسنتزی از جمله اجزای فتوسیستم II می‌شود (Dikkaya and Ergun, 2014; Alahbakhsh *et al.*, 2018). محلول کادمیوم پاشش‌شده به سطح برگ به احتمال زیاد از طریق قسمت‌های آپوپلاستی و سیم‌پلاستی این اجزا جذب می‌شود. با این حال، سازوکار دقیق جذب کادمیوم محلول‌پاشی شده به برگ یا سایر اجزای اندام‌های هوایی در پژوهش‌ها به اندازه کافی مورد مطالعه قرار نگرفته است (Li *et al.*, 2020). شیرخانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که تیمار پاشش برگی با کادمیوم ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی تاتوره را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش دیگر نشان داده شد که محلول‌پاشی کادمیوم به‌طور معنی‌داری زیست‌توده گندم و محصول دانه را کاهش می‌دهد (Li *et al.*, 2020). مطالعات نشان داده‌اند که غلظت‌های بالاتر کادمیوم موجب مهار فتوسنتز، افزایش کنترل نشده رادیکال‌های آزاد و تغییر در زیرساخت‌های گیاهی می‌شود (Khan *et al.*, 2013; Alahbakhsh *et al.*, 2018). رئیسی‌ساداتی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که تحت تنش کادمیوم و جیوه مقدار کمی پروتئین کل نسبت به حالت کنترل افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که گیاه در جهت مقابله با تنش فلزات سنگین شروع به سنتز پروتئین‌های دفاعی کرده و متابولیت‌ها و آنزیم‌های موجود در ساختار پروتئین‌ها را درگیر می‌سازد. همچنین بیان کردند که تحت برهمکنش فلزات سنگین کادمیوم و جیوه میزان پروتئین کل و قند محلول در بذور گنبد و تجن گندم به‌ترتیب افزایش و کاهش یافت. در مزارعی که به فلزات سنگین آلوده شده‌اند، استفاده از گیاهان زراعی که کارایی بالاتری در جذب فلزات سنگین داشته باشند می‌تواند یک استراتژی مفید برای مدیریت اراضی درزمینه تنش فلزات سنگین باشد. نجفی و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که تأثیر کاربرد کلرید جیوه موجب بروز تنش اکسیداتیو گردیده و بر فرآیندهای بیوشیمیایی و بیان ژن‌ها در ژنوتیپ‌های مورد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

مطالعه تأثیرگذار بوده است، به‌طوری‌که پاسخ ژنوتیپ‌ها به کاربرد مقادیر مختلف کلرید جیوه متفاوت است. گندم علاوه بر ارزش تغذیه‌ای، توانایی بالایی در کاهش تنش فلزات سنگین ناشی از کادمیوم دارد که در تعیین برنامه‌های تناوبی می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد (اسکندری و عالی‌زاده امرایی، ۱۳۹۶). میزان جذب کادمیوم توسط گیاه و غلظت آن در یک گیاه، به شرایط محیطی، فیزیولوژیکی و فاکتورهای بیوشیمیایی بستگی دارد. بنابراین به‌نظر می‌رسد ارقام مختلف گیاه، ظرفیت‌های آنتی‌اکسیدانی متفاوتی را برای مقابله با خسارت ناشی از تنش اکسیداتیو، استفاده می‌نماید (Moharramnejad and Valizadeh, 2015). محققان گزارش کردند که افزایش غلظت کادمیوم با کاهش وزن خشک بخش هوایی و ریشه و افزایش میزان انباشت کادمیوم در گیاه همیشه‌بهار همراه بود (Yadegari *et al*., 2017). همچنین در آزمایشی مشاهده شده است که کادمیوم در ریحان موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز و همچنین کاهش نیتروژن و درصد اسانس می‌شود (Hosseinpour and Afshari, 2015). رئیسی‌ساداتی و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که در دو رقم گنبد و تجن، با تیمار کلرید جیوه میزان پروتئین کل افزایش یافته و کاهش معنی‌داری در میزان قند محلول و آنزیم پلی‌فنل اکسیداز نسبت به تیمار شاهد ملاحظه شد. همچنین در رقم گنبد با افزایش غلظت جیوه از فعالیت کاتالاز و پراکسیداز کاسته شد، اما در رقم تجن فعالیت این آنزیم‌ها افزایش یافت. با وجود پیشرفت قابل توجه در سال‌های اخیر در مورد جذب ریشه‌ای، داده‌های نسبتاً کمیابی در مورد جذب برگی فلزات وجود دارد. در حقیقت، جذب برگی و انباشتگی فلز در مطالعات اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Shahid *et al*., 2017). به‌دلیل اهمیت گندم به‌عنوان یک محصول راهبردی و با توجه به آلودگی‌های محیطی فلزات سنگین و گسترش روز افزون آن‌ها و خسارت‌شان به گیاهان زراعی، موجب شد تا تأثیر تغذیه برگی فلزات سنگین کادمیوم، جیوه و برهمکنش این دو فلز سنگین بر روی بذر و کشت مجدد این بذور و ارزیابی تغییر پارامترهای مورفولوژیک و فیزیولوژیک مهم و مؤثر در سازوکارهای دفاعی گیاه از اهداف این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی و آزمایشگاه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی به‌صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول ارقام گندم (مروارید و فلات) و فاکتور دوم فلزات سنگین (کادمیوم، جیوه و برهم‌کنش کادمیوم با جیوه) همراه با گیاه‌چه‌های شاهد در نظر گرفته شد. تیمارهای آزمایشی به همراه کد تیماری در جدول ۱ ارائه شده است. بذور مورد مطالعه از مرکز تحقیقات کشاورزی اردبیل تهیه شده بود. بذور تیماری حاصل به داخل گلدان‌های پلاستیکی حاوی خاک و ماسه الک شده به‌صورت ۵۰ درصد مخلوط، منتقل گردیده و کشت شدند. بذور با تراکم هفت بوته در هر گلدان کشت شد. نمونه‌برداری بعد مرحله سنبله‌دهی گیاه گندم، از نمونه‌های تیماری و شاهد انجام گرفت.

اندازه‌گیری صفات مورفولوژیکی: برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و اجزای عملکرد بعد از رسیدگی به‌صورت کامل کف بر شده و به آزمایشگاه منتقل شد. صفات مورفولوژیک از جمله ارتفاع تک بوته، طول سنبله، طول ساقه، تعداد دانه، وزن سنبله، وزن ساقه، وزن ریشه، وزن دانه و وزن خشک کل شش بوته به‌صورت تصادفی در داخل هر گلدان در زمان رسیدگی گیاه اندازه‌گیری شدند. در پایان، ریشه‌ها از اندام هوایی قطع و با ترازوی دیجیتال وزن گردیدند. پس از ثبت وزن ریشه‌ها، بافت‌های گیاهی برای مدت ۴۸ ساعت درون آون و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس با ترازوی دیجیتال وزن شدند.

تعیین مقدار کمی پروتئین محلول برگ: غلظت پروتئین به روش Bradford (۱۹۷۶) تعیین گردید. به‌منظور رسم منحنی استاندارد پروتئین، از پروتئین استاندارد بومین سرم آلبومین گاوی (BSA) استفاده شد و مقدار پروتئین در طول‌موج ۵۹۵

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

جدول ۱- تیمارهای آزمایش

تیمارهای آزمایشی	غلظت مورد استفاده
کلرید کادمیوم $CdCl_2$	۰/۵ میلی‌مولار (mM)
کلرید جیوه $HgCl_2$	۱۰ و ۲۰ میکرومولار (µM)
برهمکنش کادمیوم با جیوه $CdCl_2$- $HgCl_2$	۱۰ میکرومولار جیوه با ۰/۵ میلی‌مولار کادمیوم
برهمکنش کادمیوم با جیوه $CdCl_2$- $HgCl_2$	۲۰ میکرومولار جیوه با ۰/۵ میلی‌مولار کادمیوم

نانومتر با اسپکتروفتومتر (مدل UV-160A- SHIMADZO ساخت کشور ژاپن) ثبت شد.

قندهای محلول: سنجش قندهای محول کل به روش Omokolo و همکاران (۱۹۹۶) انجام شد. بدین منظور ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه برداشته و سپس ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد به آن افزوده و به لوله آزمایش درب‌دار انتقال یافت و برای مدت ۳۰ ثانیه ورتکس شد. بخش مایع رویی به لوله آزمایش منتقل شده و به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. پس از جداسازی محلول رویی، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی برداشته و داخل لوله‌های آزمایشی ریخته شد. بعد از آن ۳ میلی‌لیتر آنترون به آن اضافه و به‌مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری قرار گرفت. بعد نمونه‌ها در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر در دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد.

سنجش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز: فعالیت سینتیکی آنزیم کاتالاز با استفاده از روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) صورت گرفت. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز، ۲/۵ میلی‌لیتر بافر تریس ۵۰ میلی‌لیتر با pH= ۷، و ۰/۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۵ میلی‌لیتر با هم مخلوط گردیده و بلافاصله ۶۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به آن افزوده شد. سپس تغییرات جذب محلول بلافاصله در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت گردید. برای سنجش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز از روش Kar و Mishra استفاده گردید (۱۹۷۶). بدین منظور ۲/۵ میلی‌لیتر از بافر تریس ۱۰۰ میلی‌لیتر با pH= ۷، آب اکسیژنه ۵ میلی‌لیتر، پیروگالل ۱۰۶ میلی‌لیتر در حمام یخ با هم مخلوط و به آن ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد و منحنی تغییرات جذب در طول‌موج ۴۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر خوانده شد. به‌منظور سنجش آنزیم پلی‌فنل اکسیداز، ۱/۵ میلی‌لیتر بافر تریس ۰/۲ مولار با pH برابر ۷/۶ و ۰/۴ میلی‌لیتر پیروگالل ۰/۰۲ مولار در داخل حمام یخ اضافه شد سپس به مجموعه فوق، ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی اضافه شد و پس از قرار گرفتن در حمام آب گرم با دمای ۲۵ درجه میلی‌لیتر به مدت پنج دقیقه، منحنی تغییرات جذب در طول‌موج ۴۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر ثبت شد.

کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌های حاصل از این آزمایش، با کمک نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد معنی‌داری انجام شد.

نتایج و بحث

مطابق جدول تجزیه واریانس، برهمکنش رقم و فلزات سنگین در رابطه با میزان پروتئین کل، قند محلول، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز، طول سنبله، وزن ساقه و وزن دانه در سطح احتمال یک درصد و برای وزن سنبله در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود، اما برای بقیه صفات مورد مطالعه معنی‌دار نبود. همچنین اثر اصلی فلزات سنگین بر طول ساقه، ارتفاع بوته، تعداد دانه و وزن خشک کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جداول ۲ و ۳).

پروتئین کل محلول و قند محلول: نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در رقم فلات با افزایش سطح تنش فلز سنگین جیوه میزان پروتئین کل محلول و قند محلول نسبت به شاهد افزایش یافت، اما در تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار میزان قند محلول کاهش یافت. همچنین اثر توأم کادمیوم با جیوه در رقم فلات موجب افزایش پروتئین کل و قند محلول نسبت به

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس سطوح تنش فلزات سنگین بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		وزن خشک کل	وزن دانه	وزن ریشه	وزن ساقه	وزن سنبله	تعداد دانه	ارتفاع بوته	طول ساقه	طول سنبله
رقم	۱	۰/۴۰۳^{ns}	۶۴/۴۸۸**	۰/۰۳۹^{ns}	۰/۱۳۳^{ns}	۲۲۴/۷۱**	۶/۲۵^{ns}	۴/۰۰^{ns}	۳۵/۰۰^{ns}	۰/۳۴۰^{ns}
تنش فلزات سنگین	۵	۳۷/۰۹۳**	۷۰/۳۰۸**	۲/۸۰۵^{ns}	۵/۹۳۰^{ns}	۲۵۹/۸۲**	۱۶۴۸/۱**	۳۰۹/۷۹**	۱۶۱/۶۷**	۶/۹۶۲**
رقم×تنش فلزات سنگین	۵	۱/۳۰۰^{ns}	۲۷/۶۵۵**	۱/۵۲۴^{ns}	۱۰/۳۵۸**	۷۲/۴۱*	۶۹۵/۸^{ns}	۴۱/۵۳^{ns}	۵۵/۸۹^{ns}	۲/۳۰۶**
خطا	۲۴	۱/۳۳۷	۶/۸۶	۱/۲۰۱	۲/۳۹۶	۲۳/۲۸	۳۲۴/۴	۳۴/۱۴۵	۲۴/۹۰	۰/۴۳۷
ضریب تغییرات (٪)	-	۳۶/۰	۳۴/۷	۵۳/۸	۴۸/۹	۳۲/۴	۳۲/۳	۱۳/۴	۱۳/۷	۱۰/۳

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

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس قند محلول، پروتئین کل و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گندم تحت تنش فلزات سنگین

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		قند محلول	پروتئین کل	کاتالاز	پراکسیداز	پلی‌فنل اکسیداز
رقم	۳	۰/۰۰۱**	۴۱/۵۵۰^{ns}	۲/۶۷۳**	۳۹/۶۹۹**	۰/۰۷۵^{ns}
تنش فلزات سنگین	۲	۰/۲۹۰**	۸۳۵/۳۷۶**	۲/۹۴۳**	۷/۹۲۹^{ns}	۰/۸۷۶^{ns}
رقم × تنش فلزات سنگین	۶	۰/۰۱۸**	۱۵۱۵/۸۶۰**	۴/۷۲۷**	۳۲/۵۲۲**	۲/۰۷۸**
خطا	۹۶	۰/۰۰۰	۱۷۷/۵	۰/۰۵۹	۳/۳۵۷	۰/۳۸۱
ضریب تغییرات (٪)	-	۴/۸	۱۱/۳	۳۱/۲	۲۰/۲	۲۴/۴

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

جدول ۴- تاثیر فلزات سنگین بر محتوای برخی اسمولیت‌ها و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان در گندم

رقم × تنش فلزات سنگین		میانگین (میلی‌گرم بر گرم)		میانگین (تغییرات جذب در میلی¬گرم پروتئین)		
		قند محلول	پروتئین کل	کاتالاز	پراکسیداز	پلی‌فنل اکسیداز
رقم اول	شاهد	۱/۱۳۲^{i}	۹۳/۹۱۷^{d}	۰/۲۹۱^{cd}	۱۲/۶۵۷^{a}	۳/۱۸۴^{ab}
	جیوه ۱۰ میکرومولار	۱/۳۰۰^{e}	۱۱۸/۴۵۴^{bc}	۰/۵۹۰^{c}	۶/۵۹۴^{efg}	۲/۵۰۶^{bcd}
	جیوه ۲۰ میکرومولار	۱/۴۱۲^{d}	۱۲۲/۶۸۲^{b}	۱/۰۰۴^{b}	۹/۲۷۳$^{b-f}$	۲/۴۵۲^{bcd}
	کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار	۱/۰۸۸^{j}	۱۲۰/۱۱۷^{b}	۰/۴۴۹^{cd}	۳/۵۸۹^{g}	۱/۸۳۱^{cd}
	کادمیوم × جیوه ۱۰ میکرومولار	۱/۱۵۹^{h}	۱۲۱/۵۰۳^{b}	۰/۱۰۳^{d}	۶/۲۴۱^{fg}	۱/۷۷۰^{cd}
	کادمیوم × جیوه ۲۰ میکرومولار	۱/۵۴۳^{b}	۱۲۴/۲۰۶^{b}	۰/۶۱۵^{c}	۹/۶۳۳$^{a-e}$	۳/۱۲۰^{ab}
رقم دوم	شاهد	۱/۱۹۵^{g}	۱۴۵/۴۸۵^{a}	۰/۳۵۰^{cd}	۷/۸۲۹$^{c-f}$	۲/۶۴۵^{abc}
	جیوه ۱۰ میکرومولار	۱/۲۲۲^{f}	۹۶/۸۲۸^{cd}	۰/۴۵۹^{cd}	۱۱/۸۶۲^{ab}	۳/۵۳۵^{a}
	جیوه ۲۰ میکرومولار	۱/۵۱۷^{c}	۱۰۳/۴۱۳^{bcd}	۰/۵۲۴^{cd}	۱۱/۲۸۵^{ab}	۱/۵۲۳^{d}
	کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار	۰/۹۶۴^{l}	۱۰۹/۷۲۰^{bcd}	۰/۳۶۳^{cd}	۱۰/۸۶۰$^{a-d}$	۲/۹۲۶^{ab}
	کادمیوم × جیوه ۱۰ میکرومولار	۱/۰۲۱^{k}	۱۰۱/۴۰۳^{bcd}	۴/۲۵۳^{a}	۱۱/۰۵۱^{abc}	۳/۰۵۲^{ab}
	کادمیوم × جیوه ۲۰ میکرومولار	۱/۶۳۲^{a}	۱۵۶/۹۲۲^{a}	۰/۳۷۳^{cd}	۷/۷۰۰^{def}	۱/۷۳۲^{cd}

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

شاهد شد. از طرف دیگر در رقم مروارید میزان قند محلول بجز تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار و برهمکنش کادمیوم با جیوه ۱۰ میکرومولار در بقیه سطوح تنش فلزات سنگین نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۴). همچنین بجز برهمکنش کادمیوم با جیوه ۲۰ میکرومولار با افزایش غلظت‌های کلرید جیوه و کلرید کادمیوم کاهش معنی‌داری در میزان پروتئین کل نسبت به شاهد ملاحظه گردید. بین سطوح تیماری فلزات سنگین در رقم مروارید، اثر توأم تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با جیوه ۲۰ میکرومولار موجب افزایش ۴۴/۱۶ درصدی قند محلول و ۶۷/۰۸ درصدی پروتئین کل نسبت به شاهد شد. کمترین میزان این صفات به‌ترتیب مربوط به رقم فلات شاهد و اعمال ۰/۵ میلی‌مولار تنش کادمیوم در بذر رقم مروارید به دست آمد (جدول ۴). پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند که مقدار پروتئین کل با تیمار تنش کادمیوم در گیاه مارتیغال کاهش می‌یابد. این نتایج با تحقیق حاضر در رابطه با کاهش پروتئین کل در رقم مروارید تحت تنش کادمیوم هم‌خوانی دارد. همسو با نتایج تحقیق حاضر، پژوهشگران متعددی کاهش محتوای پروتئین کل را تحت تأثیر تنش کادمیوم گزارش نمودند (حسینی و همکاران، ۱۴۰۱). کاهش میزان پروتئین کل تحت تنش کادمیوم و جیوه احتمالاً به‌علت تجمع بیش از حد این فلزات و اتصال آن‌ها به گروه‌های سولفیدریل پروتئین‌های ساختاری و آنزیم‌ها بوده که موجب مهار فعالیت، کاهش تولید پروتئین، تخریب ساختارهای پروتئینی و تداخل با تنظیم آنزیمی – احیائی و در نهایت منجر به آزادسازی رادیکال‌های آزاد شده باشد (رئیسی‌ساداتی و همکاران، ۱۳۹۴). گیاه در جهت مقابله با تنش فلزات سنگین شروع به سنتز پروتئین‌های دفاعی می‌کند، در این راستا متابولیت‌ها و آنزیم‌های موجود در ساختار پروتئین‌ها را درگیر می‌سازد (رئیسی‌ساداتی و همکاران، ۱۳۹۴). در این راستا افزایش پروتئین کل بذر رقم گندم در اثر تیمار جیوه گندم و برهم‌کنش کادمیوم با جیوه احتمالاً به‌دلیل افزایش سنتز پروتئین‌ها و پلی‌پپتیدهای درگیر در سیستم دفاعی سلول در برابر متالوتیونین‌ها و یا سنتز بعضی آنزیم‌ها از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، است (Cobbett and Goldsbrough, 2002). اثر توأم کادمیوم با جیوه در رقم فلات موجب افزایش قند محلول نسبت به شاهد شد افزایش کربوهیدرات به‌عنوان یک پیام متابولیکی عمل می‌کند و موجب افزایش بیان ژن‌های مربوط به دفاع و کاهش فتوسنتز می‌شود (Kocal *et al.*, 2008). این پدیده احتمالاً مکانیسم سازشی گیاه برای حفظ پتانسیل اسمزی در شرایط سمیت با کادمیوم است (بهنام و همکاران، ۱۳۹۸). افزایش قندها در گیاهان رزماری، کلزا و عدس تحت تأثیر فلزات سنگین توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Noorani Azad and Kafilzadeh, 2012). زیرا در حضور کادمیوم انتقال آب کاهش می‌یابد و این امر موجب افزایش قندهای محلول در اندام‌های گیاهان می‌شود تا گیاه با حفظ فشار اسمزی قادر به جذب آب بیشتری شود (Ahmad and Sharma, 2010). علاوه‌بر این گیاهان به منظور حفظ متابولیسم پایه میزان قندهای محلول را افزایش می‌دهند زیرا به وسیله فلزات سنگین فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیکی نظیر آمیلاز که نشاسته را به قند تبدیل می‌کند و نیز آنزیم‌های تجزیه‌کننده قندهای غیرمحلول نظیرانورتاز و سوکروزسنتاز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. Azizollahi و همکاران (۲۰۱۹) افزایش قند محلول را پس از تیمار با تنش کادمیوم گزارش کردند. شیرخانی و همکاران (۱۴۰۰) بیان کردند که کادمیوم در درمنه خزری موجب کاهش در فاکتورهای رشد، محتوای کربوهیدرات‌های محلول و افزایش در محتوای پروتئین کل شد، که با نتایج به دست آمده ما در رابطه با کاهش محتوای قند محلول و افزایش پروتئین کل در رقم فلات همسو و مطابقت داشت.

فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پر اکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز: نتایج مقایسه میانگین این پژوهش نشان داد که با افزایش سطح تنش جیوه، کادمیوم و برهمکنش آن‌ها در دو رقم مورد مطالعه میزان فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین و کمترین میزان آنزیم کاتالاز به‌ترتیب در ارقام مروارید و فلات گندم تحت برهمکنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با جیوه ۱۰ میکرومولار به‌دست آمد (جدول ۴). همچنین در بذور رقم فلات کاهش معنی‌داری در فعالیت آنزیم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

پراکسیداز و آنزیم پلی‌فنل اکسیداز تحت تنش فلزات سنگین کادمیوم، جیوه و برهمکنش آن‌ها نسبت به شاهد ملاحظه شد. رقم مروارید از افزایش معنی‌داری در میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (بجز اثر توأم کادمیوم با جیوه ۲۰ میکرومولار) و آنزیم پلی‌فنل اکسیداز (بجز تیمار جیوه ۲۰ میکرومولار و اثر توأم کادمیوم با جیوه ۲۰ میکرومولار) نسبت به شاهد برخوردار بود. بیشترین و کمترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌ترتیب در سطح شاهد و اعمال تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار در رقم فلات به دست آمد، در حالی‌که بیشترین و کمترین میزان فعالیت پلی‌فنل اکسیداز در رقم مروارید به‌ترتیب تحت تنش فلز سنگین جیوه ۱۰ میکرومولار و ۲۰ میکرومولار مشاهده شد (جدول ۴). گیاهان سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی پیچیده‌ای را در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند تنش فلزات سنگین توسعه داده‌اند. افزایش در ظرفیت آنزیم‌های مهارکننده گونه‌های فعال اکسیژن تحت تنش سرب و روی در گیاهان تیمارشده با این فلزات سنگین مشاهده شده است (مژدهی و همکاران، ۱۴۰۱). مهربانی و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند که بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار ۲ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم در بذر معمولی شد. بهنام و همکاران (۱۳۹۸) دریافتند که تنش کادمیوم باعث افزایش سه برابری در فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز نسبت به شاهد گردید. حسینی و همکاران (۱۴۰۱) افزایش آنزیم‌های کاتالاز و پلی‌فنل اکسیداز ۲۴ ساعت بعد از اعمال تیمار کادمیوم را گزارش نمودند. در تحقیق حاضر، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز بذور فلات و مروارید گیاهچه‌های گندم به نوعی قابل انتظار بود، چرا که بایستی در راستای حفظ وضعیت ردوکس سلولی و سمیت‌زدایی پراکسید هیدروژن تولیدشده توسط آنزیم‌هایی همچون سوپراکسید دسموتاز وارد عمل شود. به نظر می‌رسد که با تیمار کادمیوم میزان تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن شدت بیشتری پیدا کرده و گیاه برای مبارزه با آن القاء فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی خود را افزایش داده است (بهنام و همکاران، ۱۳۹۸). نجفی و همکاران (۱۳۹۹) اظهار داشتند که در شرایط کاربرد ۵ و ۱۰ میکرومولار جیوه میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش یافت، ولی فعالیت آن در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه گندم در سطح تنش ۱۵ میکرومولار کاهش یافت. فلز سنگین کادمیوم برای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سمی است، وجود این عنصر با اتصال به ساختمان آنزیم سبب آسیب به ساختمان و کاهش فعالیت آن می‌گردد (Daneshmand *et al.*, 2010). مطالعات امینی و بلوچی (۱۳۹۶) نشان داد تمام انواع فلزات سنگین فعالیت آنزیم پراکسیداز را افزایش و پروتئین محلول برگ را کاهش دادند و میزان فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز فقط در سطح نیترات سرب کاهش یافت. نتایج به دست آمده در رابطه با افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز در غلظت ۱۰ میکرومولار جیوه و کاهش این آنزیم‌ها در غلظت ۲۰ میکرومولار جیوه نسبت به شاهد در رقم مروارید با گزارش‌های فوق همسو است. در مطالعاتی نشان داده شده که غلظت‌های افزایش‌یافته فلزات سنگین در نهایت به کاهش همه آنزیم‌های اکسیداتیو منجر می‌شود (Kovacik *et al.*, 2017). تأثیر طولانی مدت فلزات سنگین ابتدا سبب القاء و افزایش فعالیت آنزیم‌ها به‌خصوص پراکسیدازها و بعد از آن سبب کاهش فعالیت می‌گردد (Maleki *et al.*, 2017). کاهش مقدار این آنزیم‌ها در بالاترین سطح تنش می‌تواند به‌دلیل سمیت بالا و آسیب جدی اندامک‌های سلولی و اختلال در فرآیند تولید این آنزیم‌ها باشد (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین کاهش فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز در غلظت‌های بالا می‌تواند به دلیل غیرفعال شدن آنزیم توسط گونه‌های فعال اکسیژن، کاهش سنتز آنزیم و یا تغییر در اجتماع زیرواحدهای آنزیم باشد. از طرف دیگر، فعال‌شدن پروتئازهای پراکسیزومی، ممکن است دلیل دیگری برای کاهش فعالیت این آنزیم باشد (Mishra *et al.*, 2006). افزایش میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در عدس طی تنش کادمیوم توسط Barandeh و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است. همچنین شیرخانی و همکاران (۱۴۰۰) اظهار داشتند تیمار با کادمیوم موجب افزایش در فعالیت آنزیم پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز شد، که این یافته‌ها با نتایج تحقیق حاضر در رابطه با افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز و پلی‌فنل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

اکسیداز تحت تنش کادمیوم رقم مروارید مطابقت دارد. کاهش مقدار آنزیم پلی‌فنل اکسیداز بذور رقم فلات در حضور کادمیوم احتمالاً به‌دلیل غیرفعال شدن آنزیم در حضور این فلز سنگین باشد. این کاهش در کارهای دیگر محققین نیز گزارش شده است (Borjian *et al.*, 2018). امینی و بلوچی (۱۳۹۶) دریافتند که در حضور فلزات سنگین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز) گیاه لوبیا چیتی افزایش نشان دادند. که با نتایج به‌دست آمده ما در رابطه با افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز در رقم مروارید هم‌راستا است.

طول سنبله، طول ساقه و ارتفاع بوته: افزایش سطوح تنش فلزات سنگین موجب کاهش طول ساقه، طول سنبله و ارتفاع بوته شد، به‌طوری‌که بیشترین و کمترین طول ساقه به-ترتیب مربوط به سطح شاهد (۴۳/۸۳ سانتی‌متر) و ترکیب تیماری کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با جیوه ۲۰ میکرومولار (۳۱/۲۵ سانتی‌متر) بود. همچنین بالاترین و کمترین ارتفاع تک بوته به ترتیب در سطح شاهد با میانگین ۵۵/۵۰ سانتی‌متر و تحت تنش برهمکنش فلزات سنگین کادمیوم و جیوه با میانگین ۳۷/۰۸ سانتی‌متر به‌دست آمد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد، تنش کادمیوم، جیوه و برهمکنش کادمیوم با جیوه در ارقام فلات و مروارید اثر منفی بر طول سنبله داشت. کمترین طول سنبله (۵/۰۰ سانتی‌متر) در رقم فلات تحت تنش جیوه ۲۰ میکرومولار و بیشترین آن (۸/۶۶ سانتی‌متر) در رقم مروارید شاهد ملاحظه شد (جدول ۶). Saba و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که افزایش طول دوره پرشدن دانه و کاهش ارتفاع بوته و طول سنبله سبب افزایش صفات تعداد سنبله در بوته، وزن هزار دانه و کاهش تعداد دانه در سنبله می‌شود. بنابراین در این تحقیق افزایش طول سنبله در ارقام فلات و مروارید تحت شرایط کنترل را می‌توان به افزایش تعداد دانه در سنبله نسبت داد. عبدوسی (۱۳۹۷) بیان کرد که کادمیوم باعث کاهش رشد اندام‌های هوایی اسفناج می‌شود. Saraswat و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که افزایش غلظت جیوه موجب کاهش طول ساقه گندم شد. در همین راستا، نجفی و همکاران (۱۳۹۹) نیز گزارش کردند که با افزایش سطح تنش کلرید جیوه، طول گیاهچه گندم و طول ساقه کاهش یافت. کاهش ارتفاع بوته با کاربرد غلظت بالای کادمیوم در لوبیا نیز گزارش شد (Howladar, 2014)، گزارشات فوق با نتایج تحقیق حاضر در رابطه با کاهش طول ساقه، طول سنبله و ارتفاع بوته تحت تنش فلزات سنگین کادمیوم و جیوه مطابقت داشت. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهند که فلز سنگین جیوه با تأثیر بر تقسیم سلولی و تنظیم رشد و نمو منطقه مریستمی گیاهان، موجب کاهش گره‌ها و فاصله بین آن‌ها می‌شود و در پی آن ارتفاع گیاه کاهش می‌یابد (Yousefi *et al.*, 2019). بهنام و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند که اثر کادمیوم بر طول ساقه معنی‌دار نبود. مژدهی و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که در آفتاب‌گردان زینتی با افزایش غلظت عناصر سمی کادمیوم و سرب، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه نسبت به شاهد به‌شدت کاهش یافت. کاهش رشد گیاه ممکن است به‌دلیل ممانعت از فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز در نتیجه تنش فلزات سنگین باشد که ممکن است سیستم فعالیتی آنتی‌اکسیدانی را تضعیف کرده و در نهایت رشد گیاه را کاهش دهد (Maleki *et al.*, 2017). همچنین Zhang و همکاران (۲۰۱۸) اظهار داشتند که کاهش رشد گیاهان در معرض سرب و کادمیوم احتمالاً به دلیل مهار فعالیت‌های متابولیکی مهم نظیر تنش اکسیداتیو، فتوسنتز و تنفس است.

تعداد دانه، وزن سنبله، وزن ساقه و وزن دانه: نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین نشان داد که برای تعداد دانه در بین سطوح تنش فلزات سنگین اختلاف معنی‌داری از نظر آماری مشاهده شد، به‌طوری‌که با افزایش سطوح تنش فلز سنگین جیوه و برهمکنش کادمیوم با جیوه تعداد دانه کاهش یافت (جدول ۵). با افزایش سطوح تنش فلزات سنگین وزن سنبله در ارقام فلات و مروارید نسبت به شاهد کاهش معنی-داری نشان داد. بیشترین وزن سنبله (۲۹/۴۱۵ میلی‌گرم) در رقم مروارید شاهد و کمترین وزن سنبله (۳/۲۴۵ میلی‌گرم) در رقم فلات با اعمال تنش فلز سنگین جیوه ۲۰ میکرومولار به‌دست آمد (جدول ۶). در رقم فلات با افزایش سطح اثرات متقابل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

جدول ۵- تأثیر فلزات سنگین کادمیوم و جیوه بر تعداد دانه، ارتفاع بوته، طول ساقه و وزن خشک کل

تنش فلزات سنگین	میانگین			
	تعداد دانه (عدد)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	طول ساقه (سانتی‌متر)	وزن خشک کل (میلی‌گرم)
شاهد	۸۳/۳۳^{a}	۵۵/۵۰^{a}	۴۳/۸۳^{a}	۵/۶۰۱^{a}
جیوه ۱۰ میکرومولار	۵۸/۳۳^{b}	۴۷/۴۱^{b}	۴۱/۲۵^{ab}	۵/۹۳۳^{a}
جیوه ۲۰ میکرومولار	۴۶/۳۳^{bc}	۳۹/۴۱^{c}	۳۳/۷۵^{c}	۴/۸۱۹^{a}
کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار	۳۳/۱۷^{c}	۴۳/۳۳^{bc}	۳۶/۵۰^{bc}	۱/۲۲۸^{b}
کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با جیوه ۱۰ میکرومولار	۵۵/۰۰^{bc}	۳۷/۰۸^{c}	۳۱/۶۶^{c}	۰/۷۵۶^{b}
کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با جیوه ۲۰ میکرومولار	۵۸/۳۳^{b}	۳۷/۰۸^{c}	۳۱/۲۵^{c}	۰/۹۲۰^{b}

جدول ۶- تأثیر فلزات سنگین کادمیوم و جیوه بر طول سنبله، وزن سنبله، وزن ساقه و وزن دانه

رقم × تنش فلزات سنگین		میانگین (cm)	میانگین (mg)	
		طول سنبله	وزن سنبله	وزن ساقه	وزن دانه
رقم اول	شاهد	۸/۰۰۰^{ab}	۲۲/۰۲۷^{ab}	۱/۷۴۰^{c}	۱۰/۵۲۳^{b}
	جیوه ۱۰ میکرومولار	۷/۰۰۰^{bc}	۱۵/۷۷۷^{bcd}	۲/۵۲۰^{bc}	۸/۹۴۵^{b}
	جیوه ۲۰ میکرومولار	۵/۰۰۰^{e}	۳/۴۲۷^{e}	۱/۶۶۰^{c}	۱/۶۱۲^{c}
	کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار	۷/۶۶۶^{ab}	۱۰/۰۱۳^{de}	۷/۲۶۰^{a}	۵/۹۹۰^{bc}
	کادمیوم × جیوه ۱۰ میکرومولار	۵/۵۰۰^{de}	۱۹/۷۴۲^{bc}	۲/۱۱۳^{bc}	۸/۵۳۷^{b}
	کادمیوم × جیوه ۲۰ میکرومولار	۵/۶۶۶^{de}	۳/۲۴۵^{e}	۳/۳۳۰^{bc}	۱/۶۱۸^{c}
رقم دوم	شاهد	۸/۶۶۶^{a}	۲۹/۴۱۵^{a}	۴/۹۷۵^{ab}	۱۷/۱۷۸^{a}
	جیوه ۱۰ میکرومولار	۵/۳۳۳^{de}	۱۹/۲۰۳^{bcd}	۳/۱۰۵^{bc}	۷/۵۰۸^{b}
	جیوه ۲۰ میکرومولار	۶/۳۳۳^{cd}	۱۲/۳۴۷^{cd}	۲/۳۷۵^{bc}	۶/۵۳۲^{b}
	کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار	۶/۰۰۰^{cde}	۱۰/۷۸۵^{cde}	۲/۴۹۷^{bc}	۶/۱۷۳^{bc}
	کادمیوم × جیوه ۱۰ میکرومولار	۵/۳۳۳^{de}	۱۴/۴۸۳^{bcd}	۲/۸۶۵^{bc}	۶/۵۰۲^{b}
	کادمیوم × جیوه ۲۰ میکرومولار	۶/۰۰۰^{cde}	۱۷/۹۷۸^{bcd}	۳/۵۳۷^{bc}	۹/۳۹۳^{b}

فلزات سنگین وزن ساقه نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد، اما برای وزن دانه ارقام فلات و مروارید این نتیجه معکوس بود و کاهش معنی‌داری نسبت به شاهد ملاحظه گردید. بیشترین و کمترین وزن ساقه مربوط به رقم فلات در اعمال تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار (۷/۲۶۰ میلی‌گرم) و جیوه ۲۰ میکرومولار (۱/۶۶۰ میلی‌گرم) بود. فلزات سنگین از طریق آسیب‌های فیزیولوژیکی سبب مهار رشد و کاهش تولید محصول گیاهان می‌شوند (رضانژاد و همکاران، ۱۳۹۶). مهربانی و همکاران (۱۳۹۸) بیان کردند که فلز کادمیوم در اسفناج باعث کاهش عملکرد و افزایش مقدار آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دسموتاز شد، که با نتایج حاصل از این تحقیق در رابطه با کاهش عملکرد و اجزای آن تحت تیمار کادمیوم مطابقت داشت، به‌طوری‌که کادمیوم موجب کاهش ۱۵۱/۲۲ درصدی تعداد دانه و نیز به‌ترتیب موجب کاهش ۴/۳۵ درصد طول سنبله، ۱۱۹/۹۸ درصد وزن سنبله و ۷۵/۶۷ درصد وزن دانه رقم فلات نسبت به شاهد شد. امینی و بلوچی (۱۳۹۶)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

بیان کردند که فلزات سنگین وزن دانه در بوته را نسبت به سطح شاهد کاهش دادند. Irfan و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که کادمیوم عملکرد گیاهان یونجه، ذرت و نخود ایرانی را کاهش داد. علائم عمومی ناشی از جذب مقادیر اضافی کادمیوم در گیاه را می‌توان کاهش عملکرد گیاه، کاهش یا توقف رشد ریشه به‌دلیل تأثیر مستقیم بر تقسیم سلول‌ها در منطقه مریستمی، چوب پنبه‌ای شدن، تداخل جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فعالیت‌های آنزیمی به‌ویژه آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز برشمرد (Rasouli-Sadaghiani *et al.*, 2019; Koleli *et al.*, 2004). گزارشات فوق با نتایج تحقیق حاضر در رابطه با کاهش عملکرد و اجزای عملکرد تحت تنش فلزات سنگین جیوه و کادمیوم و برهمکنش آن‌ها مطابقت دارد. در برخی موارد افزایش پارامترهای رشد در غلظت‌های پایین کادمیوم نیز ممکن است اتفاق افتد که می‌تواند به‌دلیل افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، افزایش حل‌پذیری ترکیبات حاوی Fe و قابلیت جذب آن، تغییر تنظیم‌کننده‌های رشد و جلوگیری از سمیت Cu، P و Mn ممانعت از کاهش Ca باشد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

وزن خشک کل: نتایج مقایسه میانگین نشان داد بجز تیمار جیوه ۱۰ میکرومولار تنش فلزات سنگین موجب کاهش معنی‌دار وزن خشک کل گندم نسبت به شاهد گردید. همچنین در پژوهش حاضر مشخص شد ترکیب تیماری کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با غلظت‌های ۱۰ میکرومولار و ۲۰ میکرومولار جیوه به‌ترتیب باعث کاهش شش و پنج برابری وزن خشک کل نسب به شاهد شد. بیشترین وزن خشک کل در تنش فلز سمی جیوه ۱۰ میکرومولار (۵/۹۳۳ میلی‌گرم) و کمترین مقدار آن در برهم‌کنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار با جیوه ۱۰ میکرومولار (۰/۷۵۶ میلی‌گرم) به‌دست آمد (جدول ۵). میزان انتقال ماده خشک و سهم این فرآیند در عملکرد دانه، بیش‌تر تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد (Seyed Sharifi and Nazarly, 2013). تولید ماده خشک در گیاهان یکی از مهمترین فاکتورهای تأثیرگذار بر روی عملکرد است (Joudi *et al.*, 2014). پورتبریزی و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند که وزن خشک اندام هوایی در غلظت ۹۰۰ میکرومولار کادمیوم کاهش چشم‌گیری نسبت به گیاه شاهد داشت و اختلاف معنی‌دار بین شاهد و این غلظت مشاهده شد. افزایش جذب کادمیوم موجب بروز عوارض نامطلوب در فیزیولوژی و متابولیسم گیاه کلزا شده و درنتیجه تولید ماده خشک کاهش یافت (قربان‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). شیرخانی و همکاران (۱۴۰۰) بیان کردند که با افزایش غلظت کادمیوم وزن تر و خشک اندام هوایی و ارتفاع درمنه خزری کاهش یافت. که با یافته‌های تحقیق حاضر در رابطه با کاهش وزن خشک کل تحت تنش کادمیوم مطابقت داشت، به‌طوری‌که در تحقیق حاضر تیمار کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار موجب کاهش سه برابری وزن خشک بوته نسبت به شاهد شد. اصغری و همکاران (۱۳۹۹) گزارش دادند که کادمیوم باعث کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک بوته، و فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و افزایش پرولین در گیاه ریحان می‌گردد..

نتیجه‌گیری

توجه به وضعیت گندم به‌عنوان محصولی راهبردی در سبد غذایی خانوارهای ایرانی به‌ویژه در شرایطی که کشت آن در اراضی کشاورزی که کم و بیش آلوده به فلزات سنگین هستند، اهمیت دارد. با توجه به نتایج این پژوهش چنین استنباط می‌شود که بذور حاصل از سمیت فلزات سنگین کادمیوم، جیوه و اثر توأم آن‌ها برخی پارامترهای مورفولوژیک و فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده را تغییر داده، به خصوص منجر به افزایش فعالیت برخی از آنزیم‌های کلیدی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی در گندم می‌شود. به‌طوری‌که میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز در رقم مروارید، به‌منظور مقابله با تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار، جیوه ۱۰ میکرومولار و اثر توأم کادمیوم با جیوه ۱۰ میکرومولار نسبت به شرایط کنترل افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد آنزیم‌های مورد مطالعه در رقم مروارید نسبت به رقم فلات نقش مهمی در دفاع گیاه گندم در برابر تنش فلزات سنگین دارند و می‌توانند تنش اکسیداتیو را کاهش دهند یا از وقوع آن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

جلوگیری کنند. به‌طورکلی بذور ارقام فلات و مروارید گندم حاصل از تیمار تنش فلزات سنگین در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومولار و ۰/۵ میلی‌مولار موجب تأثیر نامطلوب بر اجزای عملکرد و کاهش عملکرد می‌شود.

منابع

اسکندری، حمداله، و عالی‌زاده امرایی، اشرف (۱۳۹۶). مقایسه کارایی گندم، شبدر و کلزا در پالایش خاک از فلز سنگین کادمیوم. *مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۰(۲)، ۳۴۹-۳۴۵. https://doi.org/10.22077/escs.2017.589

امینی، فاطمه، و بلوچی، حمیدرضا (۱۳۹۶). تأثیر فلزات سنگین و ترکیبات مختلف بستر کاشت بر آنزیم‌های پاداکساینده و عملکرد لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri.). *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۰(۳)، ۵۱۱-۴۹۸. DOR: 20.1001.1.23832592.1396.30.3.3.6.

اصغری، محسن، معصومی‌زواریان، ابوالفضل، و یوسفی‌راد، مجتبی (۱۳۹۹). بررسی اثر سدیم نیتروپروساید در کاهش سمیت ناشی از کادمیوم در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳(۳)، ۱۰۱۸-۱۰۰۹. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2272.1582

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(۲)، ۳۱۵-۳۲۷. DOR: 20.1001.1.23832592.1398.32.2.1.6

پورتبریزی، ثریا، پورسیدی، شهرام، عبدالشاهی، روح‌اله، و نادرنژاد، نازی (۱۳۹۷). تأثیر تنش فلز کادمیوم بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی مارتیغال (*Silybum marianum*). *مجله فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۷(۲۶)، ۱۹۸-۱۸۵. DOR: 20.1001.1.23222727.1397.7.26.1.0

حسینی، شهرزاد، زارع، ناصر، شیخ‌زاده مصدق، پریسا، و ابوطالبی، شهربانو (۱۴۰۱). تأثیر نانو سیلیکون بر خصوصیات بیوشیمیایی گیاه گاوزبان اروپایی (*Borago officinalis* L.) تحت تنش کادمیوم. *مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۵(۳)، ۸۲۹-۸۱۸. https://doi.org/10.22077/escs.2021.3997.1951

رئیسی‌ساداتی، سیده یلدا، جهانبخش گده‌کهریز، سدابه، و عبادی، علی (۱۳۹۴). بررسی بیان پروتئین‌های القاءشده برگ دو رقم گندم تحت تنش کادمیوم و جیوه با استفاده تکنیک الکتروفورز دو بعدی. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۵(۱۸)، ۲۴۳-۲۳۳. https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.18.233

رئیسی‌ساداتی، سیده یلدا، و جهانبخش گده‌کهریز، سدابه (۱۳۹۴). تأثیر عناصر سنگین بر برخی اسیدآمینه‌ها، میزان قند محلول و پروتئین کل در بذور دو رقم گندم نان (*Triticum aestivum* L.). *فصل‌نامه پژوهش در اکوسیستم‌های زراعی*، ۲(۱)، ۹۵-۸۵.

رئیسی‌ساداتی، سیده یلدا، و جهانبخش گده‌کهریز، سدابه (۱۳۹۵). تأثیر کلرید کادمیوم و جیوه بر میزان قند محلول، پروتئین کل، اسیدآمینه‌های پرولین، لیزین و متیونین و برخی آنزیم‌ها در دو رقم گندم نان (*Triticum aestivum* L.). *مجله فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۵(۱۶)، ۱۴-۱. DOR: 20.1001.1.23222727.1395.5.16.11.6

رضانژاد، فرخنده، علومی، حکیمه، قلی‌پور، زینب، و منوچهری کلانتری، خسرو (۱۳۹۶). پاسخ دو گونه کاج (*Pinus nigra* و *P. elderica*) اطراف کارخانه مس سرچشمه در جذب فلزات سنگین و برخی ویژگی‌های ساختاری برگ. *پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۰(۲)، ۴۰۷-۳۹۳. DOR: 20.1001.1.23832592.1396.30.2.14.5

شیرخانی، زهره، چهرگانی‌راد، عبدالکریم، محسن‌زاده، فریبا، و غلامی، منصور (۱۴۰۰). اثر تیمار برگی کادمیوم بر ویژگی‌های ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و تکوین گامتوفیت نر و ماده در درمنه خزری (*Artemisia annua*). *مجله سلول و بافت*، ۱۲(۱)، ۷۱-۵۳. https://doi.org/10.52547/JCT.12.1.53

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

عبدوسی، سمانه (۱۳۹۷). اثرات کادمیوم و ورمی‌کمپوست بر برخی پارامترهای رشدی گیاه اسفناج (*Spinacea oleracea* L.). *نشریه تغذیه گیاهان باغبانی*، ۱(۲)، ۳۶-۲۵. https://doi.org/10.22070/HPN.2018.744

قربان‌پور، زهرا، غلامعلی‌زاده آهنگر، احمد، لکزیان، امیر، و عباس‌پور، ابوالفضل (۱۳۹۸). اثر منابع پتاسیم بر جذب و کاهش تنش کادمیوم توسط کلزا (*Brassica napus* L.). *مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۲(۱)، ۳۱۷-۳۰۷. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1033.1203

مژدهی، فاطمه، تقی‌زاده، مینا، بقائی، امیرحسین، چنگیزی، مهدی، و خاقانی، شهاب (۱۴۰۱). اثر سرب و کادمیوم در مرحله جوانه‌زنی و کاربرد ورمی‌کمپوست در پالایش آلودگی همزمان توسط آفتابگردان زینتی. *مجله فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۱(۴۷)، ۱۲۸-۱۰۹. DOR: 20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1

محمدی، میترا، خرم‌دل، زینب، واقف، الهام، غفاری‌مقدم، منصور، برخوردار، افسانه، و اکبری‌مقدم، علیرضا (۱۳۹۴). بررسی اثر سطوح مختلف عناصر روی و کادمیم بر عملکرد گیاه ترب سفید در یک خاک آهکی. *مجله زراعت و اصلاح نباتات*، ۱۱(۱)، ۲۱-۸.

نجفی، حوریه، نواب‌پور، سعید، و زینلی‌نژاد، خلیل (۱۳۹۹). بررسی بیان ژن‌های پاداکسیدان و برخی صفات بیوشیمیایی گندم نان تحت تنش فلز جیوه. *مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳(۲)، ۶۶۵-۶۵۳. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1992.1487

وجودی مهربانی، لمیا، ولی‌زاده کامران، رعنا، و میرزایی، هما (۱۳۹۸). تاثیر فلزات سنگین روی و کادمیم بر رشد و برخی صفات فیزیولوژیک اسفناج. *مجله مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی*، ۸(۲)، ۱۵۳-۱۴۳. DOR: 20.1001.1.25885073.1398.8.2.2.0

Alipour, H., Abdi, H., Rahimi, Y., & Bihamta, M. R. (2019). Investigating grain yield and yield stability of wheat cultivars introduced in Iran over the last half century. *Cereal Research*, *9*(2), 157-167. https://doi.org/10.22124/C.2019.13311.1492

Alahbakhsh, E., Sirousmehr, A., Ebrahimi, O., & Shahraki, N. (2018). Accumulation potential and tolerance to Cadmium pollution and the effect of Silicon on some physiological indices of Portulaca oleracea. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *31*(2), 235-247. DOR: 20.1001.1.23832592.1397.31.2.3.1.

Amouie, A. I., Mahvi, A. H., & Nadafi, K. (2012). Effect of chemical materials on cupper and cadmium uptake by plants in North Iran. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, *22*(86), 116-124.

Abbas, G., Murtaza, B., Bibi, I., Shahid, M., Niazi, N. K., Khan, M. I., Amjad, M., Hussain, M., & Natasha. (2018). Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: Physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(1), 59. https://doi.org/10.3390/ijerph15010059.

Azizollahi, Z., Ghaderian, S. M., & Ghotbi-Ravandi, A. A. (2019). Cadmium accumulation and its effects on physiological and biochemical characters of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *International Journal of Phytoremediation*, *21*(12), 1241-1252. https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1619163.

Ahmad, P. & Sharma, S. (2010). Physio-biochemical attributes in two cultivars of mulberry (*Morus alba* L.) under NaHCO3 stress. *International Journal of Plant Production*, *4*(2), 79-86. https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.685

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*(1-2), 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Barandeh, F., Kavousi, H. R., & Pourseyedi, S. (2014). Activity of antioxidant enzymes, PAL and proline content of lentil seedlings under cadmium stress. In Proceedings of the First Conference on New Finding in Environment and Agriculture Ecosystems. Tehran University, Tehran, Iran.

Borjian, M., Mozaffar, M. K., & Khosravireyneh, M. (2018). Effect of cadmium on some oxidative stress factors in *Brassica oleracea* L. cv. saccata in hydroponic culture. *Journal of Applied Biology (Iran)*, *31*(1), 57-74. https://doi.org/10.22051/jab.2018.3676

Chance, B. & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidases. *Methods in Enzimology*, *2*, 764-775. doi: 10.1002/9780470110171.ch14.

Cobbett, C. & Goldsbrough, P. (2002). Phytochelatins and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, *53*(1), 159-182. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.100301.135154

Daneshmand, F., Arvin, M. J., & Kalantari, K. M. (2010). Physiological responses to NaCl stress in three wild species of potato in vitro. *Acta Physiologiae Plantarum*, *32*, 91-101. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0384-2

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

Dikkaya, E. T. & Ergun, N. (2014). Effects of cadmium and zinc interactions on growth parameters and activities of ascorbate peroxidase on maize (*Zea mays* L. MAT 97). *European Journal of Experimental Biology*, *4*(1), 288-295.

Eskandari, H. (2015). The Text Book of Physiology of Abiotic Stress on Crop Plant. Arna Publication. Tehran.

FAO. (2019). Statistical data. Food and Agriculture Organization. From www.faostat.org.

Hasanuzzaman, M., Oku, H., Nahar, K., Bhuyan, M. B., Mahmud, J. A., Baluska, F., & Fujita, M. (2018). Nitric oxide-induced salt stress tolerance in plants: ROS metabolism, signaling, and molecular interactions. *Plant Biotechnology Reports*, *12*, 77-92. https://doi.org/10.1007/s11816-018-0480-0

Howladar, S. M. (2014). A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *100*(1), 69-75. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.11.022

Hosseinpour, M. A. & Afshari, H. (2015). Investigation of different levels of cadmium and lead on some phytochemical properties of *Ocimum basilicum* in salinity conditions. *Journal of Ecophytochemistry of Medicinal Plants*, *3*(2), 50-64. DOR: 20.1001.1.23223235.1394.3.2.6.3

Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A., & Alyemeni, M. N. (2013). Soil cadmium enrichment: Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *20*(1), 1-10. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.11.004

Imtiaz, M., Tu, S., Xie, Z., Han, D., Ashraf, M., & Rizwan, M. S. (2015). Growth, V uptake, and antioxidant enzymes responses of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes under vanadium stress. *Plant and Soil*, *390*(1-2), 17-27. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2341-0

Joudi, M., Ahmadi, A., Mohammadi, V., Abbasi, A., & Mohammadi, H. (2014). Genetic changes in agronomic and phenologic traits of Iranian wheat cultivars grown in different environmental conditions. *Euphytica*, *196*(2), 237-249. https://doi.org/10.1007/s10681-013-1027-7

Kar, M. & Mishra, D. (1976). Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, *57*(2), 315-319. https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315

Khatamipour, M., Piri, E., Esmaeilian, Y., & Tavassoli, A. (2011). Toxic effect of cadmium on germination, seedling growth and proline content of Milk thistle (*Silybum marianum*). *Annals of Biological Research*, *2*(5), 527-532.

Kovacik, J., Rotkova, G., Bujdos, M., Babula, P., Peterkova, V., & Matus, P. (2017). Ascorbic acid protects *Coccomyxa subellipsoidea* against metal toxicity through modulation of ROS/NO balance and metal uptake. Journal of Hazardous Materials, *339*, 200-207. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.035

Koleli, N., Eker, S., & Cakmak, I. (2004). Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil. *Environmental Pollution*, *131*(3), 453-459. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.02.012

Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Ishtiaq, M., Khan, S., Waqas, M., Wei, L., & Wang, T. (2013). Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food and Chemical Toxicology*, *58*, 449-458. https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.05.014

Kocal, N., Sonnewald, U., & Sonnewald, S. (2008). Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction between tomato and *Xanthomonas campestris* pv vesicatoria. *Plant Physiology*, *148*(3), 1523-1536. https://doi.org/10.1104/pp.108.127977

Li, L., Zhang, Y., Ippolito, J. A., Xing, W., Qiu, K., & Wang, Y. (2020). Cadmium foliar application affects wheat Cd, Cu, Pb and Zn accumulation. *Environmental Pollution*, *262*, 114329. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114329

Moharramnejad, S. & Valizadeh, M. (2015). Variation of pigment content and antioxidant enzyme activites in pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings under salt stress. *Journal of Crop Ecophysiology*, *9*(1), 153-166.

Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R. D., Kumar, R., Seth, C. S., & Gupta, D. K. (2006). Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. *Chemosphere*, *65*(6), 1027-1039. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.033

Mishra, S., Tripathi, R. D., Srivastava, S., Dwivedi, S., Trivedi, P. K., Dhankher, O. P., & Khare, A. (2009). Thiol metabolism play significant role during cadmium detoxification by *Ceratophyllum demersum* L. *Bioresource Technology*, *100*(7), 2155-2161. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.041

Maleki, M., Ghorbanpour, M., & Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. *Plant Gene*, *11*(8), 247-254. https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.04.006

Nazar, R., Iqbal, N., Masood, A., Khan, M. I. R., Syeed, S., & Khan, N. A. (2012). Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation. *American Journal of Plant Sciences*, *3*(10), 1476-1489. https://doi.org/10.4236/ajps.2012.310178

Nourbakhsh Rezaei, S. R., Shabani, L., Rostami, M., & Abdoli, M. (2019). The effect of different concentrations of cadmium chloride on oxidative stress in shoot cultures of lemon balm. *Plant Productions*, *42*(4), 509-522. https://doi.org/10.22055/ppd.2019.24806.1567

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

Noorani Azad, H. & Kafilzadeh, F. (2012). The effect of cadmium toxicity on growth, soluble sugars, photosynthetic pigments and some of enzymes in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Biology, 24*(6), 858-867.

Omokolo, N. D., Tsala, N. G., & Djocgoue, P. F. (1996). Changes in carbohydrate, amino acid and phenol contents in cocoa pods from three clones after infection with *Phytophthora megakarya* Bra. and Grif. *Annals of Botany*, *77*(2), 153-158. https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0017

Rasouli-Sadaghiani, M. H., Barin, M., Khodaverdiloo, H., Siavash Moghaddam, S., Damalas, C. A., & Kazemalilou, S. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria promote growth of Russian knapweed (*Acroptilon repens* L.) in a Cd-contaminated soil. *Journal of Plant Growth Regulation*, *38*(1), 113-121. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9815-x

Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M., & Dumat, C. (2015) Heavy metal stress and crop productivity. In: Crop Production and Global Environmental Issues (ed. Hakeem, Kh. R.) Pp. 1-25. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4-1

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, *325*, 36-58. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063

Shahid, N. M. & Khalid, S. (2020). Foliar application of lead and arsenic solutions to *Spinacia oleracea*: Biophysiochemical analysis and risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(32), 39763-39773. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06519-7

Shahid, M., Shamshad, S., Farooq, A. B. U., Rafiq, M., Khalid, S., Dumat, C., Zhang, Y., Hussain, I., & Niazi, N. K. (2019). Comparative effect of organic amendments on physio-biochemical traits of young and old bean leaves grown under cadmium stress: A multivariate analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(12), 11579-11590. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2689-4

Sobral-Souza, C. E., Leite, N. F., Cunha, F. A., Pinho, A. I., Albuquerque, R. S., Carneiro, J. N., Menezes, I. R., Costa, J. G., Franco, J. L., & Coutinho, H. D. (2014). Cytoprotective effect against mercury chloride and bioinsecticidal activity of *Eugenia jambolana* Lam. *Arabian Journal of Chemistry*, *7*(1), 165-170. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.10.003

Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, *26*, 1-26. https://doi.org/10.1155/2012/217037

Shirkhani, Z., Chehregani Rad, A., Gholami, M., & Mohsenzadeh, F. (2019). Morphological and physiological responses of *Datura stramonium* L. to cadmium toxicity. *Journal of Plant Process and Function*, *8*(32), 121-136. DOR: 20.1001.1.23222727.1398.8.32.25.3

Seyed Sharifi, R. & Nazarly, H. (2013). Effects of seed priming with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on grain yield, fertilizer use efficiency and dry matter remobilization of sunflower (*Helianthus annus* L.) with various levels of nitrogen fertilizer. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, *3*(23): 27-45.

Saba, J., Tavana, S., Qorbanian, Z., Shadan, E., Shekari, F., & Jabbari, F. (2018). Canonical correlation analysis to determine the best traits for indirect improvement of wheat grain yield under terminal drought stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *20*(5), 1037-1048. DOR: 20.1001.1.16807073.2018.20.5.10.0

Saraswat, K., Parashar, N., Snehlata, Pathak, A., & Sharma, R. (2018). Studies on the phyto-toxicity of heavy metal mercury in wheat (*Triticum aestivum* L.) I–germination percentage (GP) and speed of germination index (SGI). *Modern Concepts and Developments in Agronomy*, *2*(5), 202-220. https://doi.org/10.31031/MCDA.2018.02.000546

Vodyanitskii, Y. N. (2016). Standards for the contents of heavy metals in soils of some states. *Annals of Agrarian Science*, *14*(3), 257-263. https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.08.011

White, P. J. & Brown, P. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, *105*(7), 1073-1080. https://doi.org/10.1093/aob/mcq085

Xiong, T., Dumat, C., Dappe, V., Vezin, H., Schreck, E., Shahid, M., Pierart, A., & Sobanska, S. (2017). Copper oxide nanoparticle foliar uptake, phytotoxicity, and consequences for sustainable urban agriculture. *Environmental Science and Technology*, *51*(9), 5242-5251. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05546

Yadegari, M., Eskandari, S., & Irani Pour, R. (2017). Study of lead and cadmium accumulation in Marigold medicinal plant (*Calendula officinalis*). *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research* (*Plant Science Research*), *47*(12), 76-92.

Yousefi, Z., Kolahi, M., Majd, A., & Jonoubi, P. (2019). Cadmium effect on morphologic-anatomic characteristics and pigmentation of sugarcane (*Saccarum officinarum* L.) var Cp48-103 in vitro culture. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *31*(4), 769-781. DOI: 20.1001.1.23832592.1397.31.4.20.2

Zhang, X., Li, M., Yang, H., Li, X., & Cui, Z. (2018). Physiological responses of *Suaeda glauca* and *Arabidopsis thaliana* in phytoremediation of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, *223*, 132-139. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.025

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

Zhou, Z. S., Wang, S. J., & Yang, Z. M. (2008). Biological detection and analysis of mercury toxicity to alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Chemosphere*, *70*(8), 1500-1509. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.08.028

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]

Evaluation of important physiological traits of Morvared and Falat bread wheat cultivars under heavy metals cadmium and mercury

Sodabeh Jahanbakhsh Godehkahriz* and Seyedeh Yalda Raeisi Sadati

Department of Plant Genetics and Production Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Received: 2023/05/28, Accepted: 2023/08/15)

Abstract

Environmental pollution caused by heavy metals due to their non-degradability is a major concern in agricultural soils that threatens food security. Cadmium and mercury are among the two dangerous and carcinogenic pollutants that, in natural ecosystems are increased by human activities and lead to a decrease in protein production, the deactivation of some enzymes, disruption of various reactions and cellular actions, and the stoppage of growth and development. Since the contamination of agricultural land with heavy metals, on the one hand, leads to a decrease in the quality of agricultural products and, on the other hand, is a serious threat to human health, it needs more attention. Therefore, the purpose of this research is to investigate the effect of replanting wheat seeds resulting from the treatment of heavy metals such as cadmium and mercury on some morphophysiological parameters of two wheat cultivars. For this purpose, a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized design with three replications in the greenhouse of the University of Mohaghegh Ardabili. The first factor of wheat cultivars (Morvared and Falat) and the second factor of the experimental treatments include mercury chloride (with a concentration of 10 and 20 µM), cadmium chloride (0.5 mM), and the interaction effects of cadmium with mercury at two levels (10 µM of mercury with 0.5 mM cadmium, 20 µM mercury with 0.5 mM cadmium) were with the control seedlings. The findings showed that, except for the treatment with cadmium under the stress of the toxic metal mercury and the interaction effect of cadmium with mercury, the amount of soluble sugar and total protein, the activity of the catalase enzyme increased, but the activity of the antioxidant enzymes peroxidase and polyphenol oxidase decreased in the Morvared cultivar. The results indicate that the seeds obtained from the foliar treatment of cadmium, mercury and the interaction of these heavy metals and the re-cultivation of these seeds can affect their performance by changing the physiological characteristics. In general, under the stress of mercury chloride and cadmium chloride and their interaction, the Morvared cultivar showed a better reaction than the Falat cultivar. Therefore, based on the results of this greenhouse experiment, it seems necessary to continue research in field conditions.

Keywords: Antioxidant enzymes, Mercury chloride, Cadmium, Wheat, Yield

Corresponding author, Email: jahanbakhsh@uma.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-06-24]