

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 به دلیل تجزیه‌ناپذیری یک نگرانی اصلی در خاک‌های کشاورزی است که امنیت غذایی را تهدید می‌کند. کادمیوم و جیوه از جمله 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 آنجایی که 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 به صورت 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

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

گندم نان از مهم‌ترین غلات در سطح جهان و نیز در ایران به‌شمار می‌رود. و حدود ۲۰ درصد از اراضی جهان و از

سنگین باعث ایجاد خسارات زیادی به گندم می‌شوند، صنعتی شدن جوامع باعث آزادسازی ترکیبات سمی زیادی در بیوسفر شده است. آلاینده‌های فلزی به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثار فیزیولوژیک 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 به طور 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 برگ‌ها نیز به گیاهان وارد شوند (Xiong et al., 2017; Shahid et al., 2020). فلز جذب شده از مسیر برگ‌ها 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 بین رفتن 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

(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 پاشش شده به سطح برگ به احتمال زیاد از طریق قسمت‌های آپوپلاستی و سیم‌پلاستی این اجزا جذب می‌شود. با این حال، سازوکار دقیق جذب کادمیوم محلول پاشی 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 برگ با کادمیوم ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی تاتوره را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش دیگر نشان داده شد که محلول پاشی 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). رئیس‌ساداتی 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 گند 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 در زمینه 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

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 موتازن‌ها، 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 رویسکو، 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

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 به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول ارقام گندم (مرورید 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 به صورت 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 به صورت 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 به صورت 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. به منظور رسم منحنی استاندارد پروتئین، از پروتئین استاندارد بومین سرم آلبومین گاوی (BSA) استفاده شد و مقدار پروتئین در طول موج ۵۹۵

مطالعه تأثیرگذار بوده است، به طوری که 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 به نظر 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 برگ‌گی فلزات وجود دارد. در حقیقت، جذب برگ‌گی و انباشتگی فلز در مطالعات اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Shahid et al., 2017). به دلیل اهمیت گندم به عنوان 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 برگ‌گی فلزات سنگین کادمیوم، جیوه و برهم‌کنش این دو فلز سنگین بر روی بذر و کشت مجدد این بذور و ارزیابی تغییر

جدول ۱- تیمارهای آزمایش

غظت مورد استفاده	تیمارهای آزمایشی
۰/۵ میلی مولار (mM)	کلرید کادمیوم CdCl ₂
۱۰ و ۲۰ میکرومولار (μM)	کلرید جیوه HgCl ₂
۱۰ میکرومولار جیوه با ۰/۵ میلی مولار کادمیوم	CdCl ₂ - HgCl ₂
۲۰ میکرومولار جیوه با ۰/۵ میلی مولار کادمیوم	CdCl ₂ - HgCl ₂

خواننده شد. به منظور سنجش آنزیم پلی فنل اکسیداز، ۱/۵ میلی لیتر بافر تریس ۰/۲ مولار با pH برابر ۷/۶ و ۰/۴ میلی لیتر پیروگالال ۰/۰۲ مولار در داخل حمام یخ اضافه شد سپس به مجموعه فوق، ۰/۱ میلی لیتر عصاره آنزیمی اضافه شد و پس از قرار گرفتن در حمام آب گرم با دمای ۲۵ درجه میلی لیتر به مدت پنج دقیقه، منحنی تغییرات جذب در طول موج ۴۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر ثبت شد.

کلیه تجزیه و تحلیل های آماری داده های حاصل از این آزمایش، با کمک نرم افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال یک درصد معنی داری انجام شد.

نتایج و بحث

مطابق جدول تجزیه واریانس، برهمکنش رقم و فلزات سنگین در رابطه با میزان پروتئین کل، قند محلول، آنزیم های آنتی اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز، طول سنبله، وزن ساقه و وزن دانه در سطح احتمال یک درصد و برای وزن سنبله در سطح احتمال پنج درصد معنی دار بود، اما برای بقیه صفات مورد مطالعه معنی دار نبود. همچنین اثر اصلی فلزات سنگین بر طول ساقه، ارتفاع بوته، تعداد دانه و وزن خشک کل در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول 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 میلی مولار میزان قند محلول کاهش یافت. همچنین اثر توأم کادمیوم با جیوه در رقم فلات موجب افزایش پروتئین کل و قند محلول نسبت به

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

قندهای محلول: سنجش قندهای محلول کل به روش Omokolo و همکاران (۱۹۹۶) انجام شد. بدین منظور ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه برداشته و سپس ۵ میلی لیتر اتانول ۹۵ درصد به آن افزوده و به لوله آزمایش درب دار انتقال یافت و برای مدت ۳۰ ثانیه ورتکس شد. بخش مایع رویی به لوله آزمایش منتقل شده و به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. پس از جداسازی محلول رویی، ۰/۱ میلی لیتر از عصاره الکلی برداشته و داخل لوله های آزمایشی ریخته شد. بعد از آن ۳ میلی لیتر آترونی به آن اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه در بن ماری قرار گرفت. بعد نمونه ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر در دستگاه اسپکتروفوتومتر خوانده شد.

سنجش فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل

اکسیداز: فعالیت سینتیکی آنزیم کاتالاز با استفاده از روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) صورت گرفت. برای اندازه گیری فعالیت آنزیم کاتالاز، ۲/۵ میلی لیتر بافر تریس ۵۰ میلی لیتر با pH=۷ و ۰/۳ میلی لیتر آب اکسیژنه ۵ میلی لیتر با هم مخلوط گردیده و بلافاصله ۶۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به آن افزوده شد. سپس تغییرات جذب محلول بلافاصله در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر ثبت گردید. برای سنجش فعالیت آنزیم های پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز از روش Kar و Mishra استفاده گردید (۱۹۷۶). بدین منظور ۲/۵ میلی لیتر از بافر تریس ۱۰۰ میلی لیتر با pH=۷، آب اکسیژنه ۵ میلی لیتر، پیروگالال ۱۰۶ میلی لیتر در حمام یخ با هم مخلوط و به آن ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد و منحنی تغییرات جذب در طول موج ۴۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر

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 ^{*} به ترتیب غیر معنی دار، معنی داری 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	پلی فنل 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 ^{**}	۳۲/۵۲۳ ^{**}	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 ^{*} به ترتیب غیر معنی دار، معنی داری در سطح یک و پنج درصد

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

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

شاهد شد. از طرف دیگر در رقم مروارید میزان قند محلول بجز تنش کادمیوم ۰/۵ میلی مولار 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 میلی مولار 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 به ترتیب مربوط به رقم فلات شاهد و اعمال ۰/۵ میلی مولار تنش کادمیوم در بذر رقم مروارید به دست آمد (جدول ۴). پورتبیزی 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 به علت 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 (رئیس‌ساداتی 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 (رئیس‌ساداتی و همکاران، ۱۳۹۴). در این راستا افزایش پروتئین کل بذر رقم گندم در اثر تیمار جیوه گندم و برهم‌کنش کادمیوم با جیوه احتمالاً به دلیل 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). علاوه بر 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 نظیر انورتاز و سوکروز سنتاز 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 پلی فنل 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 به ترتیب در ارقام مروارید و فلات گندم تحت برهمکنش کادمیوم ۰/۵ میلی مولار با جیوه ۱۰ میکرومولار به دست آمد (جدول ۴). همچنین در بذور رقم فلات کاهش معنی‌داری در فعالیت آنزیم

پراکسیداز و آنزیم پلی فنل 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 پلی فنل 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 به ترتیب در سطح شاهد و اعمال تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌مولار در رقم فلوات به دست آمد، در حالی که بیشترین و کمترین میزان فعالیت پلی فنل اکسیداز در رقم مروارید به ترتیب 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 تیمار شده 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 پلی فنل اکسیداز ۲۴ ساعت بعد از اعمال تیمار کادمیوم را گزارش نمودند. در تحقیق حاضر، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز بذور فلوات و مروارید گیاهچه‌های گندم به نوعی قابل انتظار بود، چرا که بایستی در راستای حفظ وضعیت ردوکس سلولی و سمیت‌زدایی پراکسید هیدروژن تولید شده 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 پلی فنل اکسیداز فقط در سطح نیترا سرب کاهش یافت. نتایج به دست آمده در رابطه با افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی فنل 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 افزایش یافته فلزات سنگین در نهایت به کاهش همه آنزیم‌های اکسیداتیو منجر می‌شود (Kovacic *et al.*, 2017). تأثیر طولانی مدت فلزات سنگین ابتدا سبب القاء و افزایش فعالیت آنزیم‌ها به خصوص پراکسیدازها و بعد از آن سبب کاهش فعالیت می‌گردد (Maleki *et al.*, 2017). کاهش مقدار این آنزیم‌ها در بالاترین سطح تنش می‌تواند به دلیل سمیت بالا و آسیب جدی اندامک‌های سلولی و اختلال در فرآیند تولید این آنزیم‌ها باشد (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین کاهش فعالیت آنزیم پلی فنل 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، فعال شدن 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 پلی فنل اکسیداز شد، که این یافته‌ها با نتایج تحقیق حاضر در رابطه با افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز و پلی فنل

اکسیداز تحت تنش کادمیوم رقم مروارید مطابقت دارد. کاهش مقدار آنزیم پلی فنل اکسیداز بذور رقم فلات در حضور کادمیوم احتمالاً به دلیل 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 پلی فنل اکسیداز) گیاه لوبیا چیتی افزایش نشان دادند. که با نتایج به دست آمده ما در رابطه با افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی فنل 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، به طوری که بیشترین و کمترین طول ساقه به ترتیب مربوط به سطح شاهد (۴۳/۸۳ سانتی متر) و ترکیب تیماری کادمیوم ۰/۵ میلی مولار با جیوه ۲۰ میکرومولار (۳۱/۲۵ سانتی متر) بود. همچنین بالاترین و کمترین ارتفاع تک بوته به ترتیب در سطح شاهد با میانگین ۵۵/۵۰ سانتی متر و تحت تنش برهمکنش فلزات سنگین کادمیوم و جیوه با میانگین ۳۷/۰۸ سانتی متر به دست 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 سانتی متر) در رقم فلات تحت تنش جیوه ۲۰ میکرومولار و بیشترین آن (۸/۶۶ سانتی متر) 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 زیتنی با افزایش غلظت عناصر سمی کادمیوم و سرب، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه نسبت به شاهد به شدت کاهش یافت. کاهش رشد گیاه ممکن است به دلیل 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، به طوری که 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 میلی گرم) در رقم مروارید شاهد و کمترین وزن سنبله (۳/۲۴۵ میلی گرم) در رقم فلات با اعمال تنش فلز سنگین جیوه ۲۰ میکرومولار به دست آمد (جدول ۶). در رقم فلات با افزایش سطح اثرات متقابل

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

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

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

میانگین (mg)		میانگین (cm)		رقم × تنش فلزات سنگین	
وزن ساقه	وزن سنبله	طول سنبله	وزن دانه		
۱/۷۴۰ ^c	۲۲/۰۲۷ ^{ab}	۸/۰۰۰ ^{ab}	۱۰/۵۲۳ ^b	شاهد	رقم اول
۲/۵۲۰ ^{bc}	۱۵/۷۷۷ ^{bcd}	۷/۰۰۰ ^{bc}	۸/۹۴۵ ^b	جیوه ۱۰ میکرومولار	
۱/۶۶۰ ^c	۳/۴۲۷ ^e	۵/۰۰۰ ^e	۱/۶۱۲ ^c	جیوه ۲۰ میکرومولار	
۷/۲۶۰ ^a	۱۰/۰۱۳ ^{de}	۷/۶۶۶ ^{ab}	۵/۹۹۰ ^{bc}	کادمیوم ۰/۵ میلی مولار	
۲/۱۱۳ ^{bc}	۱۹/۷۴۲ ^{bc}	۵/۵۰۰ ^{de}	۸/۵۳۷ ^b	کادمیوم × جیوه ۱۰ میکرومولار	
۳/۳۳۰ ^{bc}	۳/۲۴۵ ^e	۵/۶۶۶ ^{de}	۱/۶۱۸ ^c	کادمیوم × جیوه ۲۰ میکرومولار	
میانگین (mg) <td colspan="2">میانگین (cm) <th rowspan="2">رقم × تنش فلزات سنگین</th> <th rowspan="2"></th> </td>		میانگین (cm) <th rowspan="2">رقم × تنش فلزات سنگین</th> <th rowspan="2"></th>		رقم × تنش فلزات سنگین	
وزن ساقه	وزن سنبله	طول سنبله	وزن دانه		
۴/۹۷۵ ^{ab}	۲۹/۴۱۵ ^a	۸/۶۶۶ ^a	۱۷/۱۷۸ ^a	شاهد	رقم دوم
۳/۱۰۵ ^{bc}	۱۹/۲۰۳ ^{bcd}	۵/۳۳۳ ^{de}	۷/۵۰۸ ^b	جیوه ۱۰ میکرومولار	
۲/۳۷۵ ^{bc}	۱۲/۳۴۷ ^{cd}	۶/۳۳۳ ^{cd}	۶/۵۳۲ ^b	جیوه ۲۰ میکرومولار	
۲/۴۹۷ ^{bc}	۱۰/۷۸۵ ^{cde}	۶/۰۰۰ ^{cde}	۶/۱۷۳ ^{bc}	کادمیوم ۰/۵ میلی مولار	
۲/۸۶۵ ^{bc}	۱۴/۴۸۳ ^{bcd}	۵/۳۳۳ ^{de}	۶/۵۰۲ ^b	کادمیوم × جیوه ۱۰ میکرومولار	
۳/۵۳۷ ^{bc}	۱۷/۹۷۸ ^{bcd}	۶/۰۰۰ ^{cde}	۹/۳۹۳ ^b	کادمیوم × جیوه ۲۰ میکرومولار	

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، به طوری که کادمیوم موجب کاهش ۱۵۱/۲۲ درصدی تعداد دانه و نیز به ترتیب 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)

فلزات سنگین وزن ساقه نسبت به شاهد افزایش معنی داری نشان داد، اما برای وزن دانه ارقام فلات و مروارید این نتیجه معکوس بود و کاهش معنی داری نسبت به شاهد ملاحظه گردید. بیشترین و کمترین وزن ساقه مربوط به رقم فلات در اعمال تنش کادمیوم ۰/۵ میلی مولار (۷/۲۶۰ میلی گرم) و جیوه ۲۰ میکرومولار (۱/۶۶۰ میلی گرم) بود. فلزات سنگین از طریق آسیب‌های فیزیولوژیکی سبب مهار رشد و کاهش تولید محصول گیاهان می‌شوند (رضانژاد و همکاران، ۱۳۹۶).

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 به دلیل تأثیر مستقیم بر تقسیم سلول‌ها در منطقه مرستمی، 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 به دلیل افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، افزایش حل‌پذیری ترکیبات حاوی Fe و قابلیت جذب آن، تغییر تنظیم‌کننده‌های رشد و جلوگیری از سمیت P، Cu، Mn مانعت 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 به ترتیب 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 در نتیجه 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

جولوگیری کنند. به‌طورکلی بذور ارقام فلوات 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)، ۴۹۸-۵۱۱. 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، آریتا، 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 نادرزاده، نازی (۱۳۹۷). تأثیر تنش فلز کادمیوم بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی ماریغال (*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)، ۸۱۸-۸۲۹. <https://doi.org/10.22077/escs.2021.3997.1951>
- رئیس‌ساداتی، 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)، ۲۲۳-۲۳۳. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.18.233>
- رئیس‌ساداتی، سیده یلدا، و جهانبخش گده‌کهریز، سدابه (۱۳۹۴). تأثیر عناصر سنگین بر برخی اسیدآمینها، میزان قند محلول و پروتئین کل در بذور دو رقم گندم نان (*Triticum aestivum* L.). *فصل‌نامه پژوهش در اکوسیستم‌های زراعی*، ۲(۱)، ۸۵-۹۵.
- رئیس‌ساداتی، سیده یلدا، و جهانبخش گده‌کهریز، سدابه (۱۳۹۵). تأثیر کلرید کادمیوم و جیوه بر میزان قند محلول، پروتئین کل، اسیدآمین‌های پرولین، لیزین و متیونین و برخی آنزیم‌ها در دو رقم گندم نان (*Triticum aestivum* L.). *مجله فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۵(۱۶)، ۱-۱۴. 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)، ۳۹۳-۴۰۷. 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)، ۵۳-۷۱. <https://doi.org/10.52547/JCT.12.1.53>

- عبدوسی، سمانه (۱۳۹۷). اثرات کادمیوم و ورمی کمپوست بر برخی پارامترهای رشدی گیاه اسفناج (*Spinacea oleracea* L.). نشریه تغذیه گیاهان باغبانی، ۲۱(۲)، ۳۶-۲۵. <https://doi.org/10.22070/HPN.2018.744>
- قربان پور، زهرا، غلامعلی زاده آهنگر، احمد، لکزیان، امیر، و عباس پور، 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 ورمی کمپوست در پالایش آلودگی همزمان توسط آفتابگردان زیتنی. 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، غفاری مقدم، منصور، برخوردار، افسانه، و اکبری مقدم، 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، نواب پور، 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 copper 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](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 Enzymology*, 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>

- 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 activities 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 phytochelatin 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>

- 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 Griff. *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*: Biophysicochemical 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 annuus* 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 (*Saccharum 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>

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>

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 Mohagheh 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 Mohagheh 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