تأثیر کادمیم بر برخی از شاخص‌های رشد و غلظت عناصر غذایی در رقم‌های مختلف گندم

عاطفه توکلی[1]، احمد گلچین و سمانه عبداللهی

کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛ **atefeh.tavakoli92@gmail.com**

استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛ **agolchin2011@yahoo.com**

دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛ **samaneh.abdollahi87@yahoo.com**

دریافت: **99/2/22** و پذیرش: **99/7/15**

چکیده

همگام با رشد صنعت و فناوری، ورود آلاینده‌های محیط‌زیست، به ویژه فلزهای سنگین، به خاک موجب افزایش نگرانی جامعه جهانی در مورد امنیت غذایی شده است. هدف از این مطالعه بررسی اثر کادمیم بر برخی از شاخص‌های رشد و غلظت عناصر غذایی در رقم‌های مختلف گیاه گندم بود. برای این کار یک آزمایش فاکتوریل به‌صورت گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه به اجرا درآمد. فاکتورهای مورد بررسی شامل پنج سطح آلودگی خاک به کادمیم (صفر، 10، 25، 50 و 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک) از منبع سولفات کادمیم [$3Cd(SO_4).8H_2O$]و چهار رقم گندم (زارع، پیشگام، میهن و اوروم) بودند. نتایج نشان داد که سطوح مختلف کادمیم خاک به‌طور معناداری وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه، شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع بوته، و همچنین غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و مس رقم‌های مختلف گندم را کاهش داد. بیشترین میزان صفات ذکر شده در تیمار شاهد (بدون آلودگی کادمیم) و کمترین آن ها در تیمار 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد. رقم‌های مختلف گندم واکنش متفاوتی به سطوح مختلف کادمیم خاک نشان دادند. رقم‌های پیشگام و اوروم کم‌ترین و رقم میهن بیش‌ترین حساسیت را به آلودگی خاک به کادمیم نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، فلزهای سنگین، رقم زارع، رقم پیشگام،رقم اوروم، رقم میهن

[1] نویسنده مسئول، آدرس: زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

مقدمه

سلامت بشر به استفاده از مواد غذایی و محیط سالم بستگی دارد. گیاهان به دلیل تولید مواد غذایی، ویتامین‌ها و عناصر مورد نیاز بدن مورد استفاده و توجه عموم هستند (جامز و امانوئل، 2011). در سال‌های اخیر به‌دلیل گسترش فعالیت‌های صنعتی، غلظت فلزهای سنگین در محیط‌زیست و هم‌چنین مواد غذایی افزایش یافته است. در بین فلزهای سنگین، کادمیم به دلیل حلالیت زیاد در آب و مسمومیت شدیدی که برای گیاهان، حیوانات و انسان‌ها ایجاد می‌کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (یادگاری و کریم‌پور، 2010). کادمیم عنصری غیر ضروری برای انجام فعالیت‌های حیاتی و رشد و نمو گیاه می‌باشد (سلطانی و همکاران، 1385). به‌طور کلی اکثر خاک‌های غیر آلوده به کادمیم، غلظتی کم‌تر از یک میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک دارند (0/5 تا 0/6 میلی‌گرم بر کیلوگرم) و غلظت مجاز یا ایمن آن 1/5 تا 2 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در نظر گرفته می‌شود (بلان و همکاران، 2003). این عنصر یکی از متحرک‌ترین فلزهای سنگین خاک است و به علت تحرک بالایی که دارد به راحتی جذب گیاه شده و وارد زنجیره غذایی انسان می‌گردد (کریستنسن، 1984).

کادمیم در گیاه معمولاً جذب ریشه گردیده و به کندی وارد ساقه و برگ‌ها می‌گردد و انتقال آن از برگ‌ها به میوه بسیار ناچیز می‌باشد. عوامل بسیار متعددی از قبیل اسیدیته خاک، وضعیت اکسیداسیون و احیای خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان مصرف کودهای شیمیایی، آلودگی خاک به فلزهای سنگین و گونه گیاه بر انتقال و تجمع کادمیم در گیاه مؤثرند (چاینی و هورنیک، 1978). جوادزرین و متشرع‌زاده (1394) با بررسی تأثیر کادمیم بر 14 رقم گندم گزارش کردند که رقم‌های مختلف گندم از لحاظ خصوصیات فیزیولوزیک متفاوت هستند و پاسخ متفاوتی نسبت به تنش کادمیم می‌دهند. همچنین تحقیقات آن‌ها نشان داد در سطح 80 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، رقم پیشگام بیش‌ترین غلظت کادمیم اندام هوایی (میانگین 20 میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) را داشت. آن‌ها دلیل این امر را کارایی بیش‌تر سامانه آنتی‌اکسیدانی[1] این رقم در تجمع و سمیت‌زدایی از کادمیم در سلول‌ها نسبت به رقم‌های دیگر گندم عنوان کردند. جعفرنژادی و همکاران (1391) نیز بیان کردند که فراهمی فلز سنگین کادمیم برای رقم‌های مختلف گندم تحت تأثیر ویژگی‌های خاک و نوع رقم گندم قرار می‌گیرد. مطالعات صورت گرفته بیانگر خصوصیات فیزیولوژیکی متفاوت و هم‌چنین جذب متفاوت فلزهای سنگین در رقم‌های مختلف گندم است.

علائم سمیت کادمیم در گیاهان به آسانی قابل تشخیص است. شایع‌ترین این نشانه‌ها ایجاد اختلال در فرآیند جذب و انتقال عناصر (وو و همکاران، 2007)، کمبود عناصر غذایی در گیاه، جلوگیری از سنتز کلروفیل (قادریان و جمالی حاجیانی، 2010)، کاهش وزن اندام هوایی و طول ریشه (موریفاح، 2008)، کم شدن انبساط سلولی، تأخیر در رشد گیاه (شوتزندوبل و همکاران، 2001)، زرد شدن برگ‌ها و قهوه‌ای شدن ریشه (واسیلو و همکاران، 2005) و بافت‌مردگی و ریزش برگ‌ها (داوری و همکاران، 2010) می‌باشد. با مطالعه گسترده در 30 کشور جهان بر روی دو گیاه گندم و ذرت مشخص شد که مقدار کادمیم جذب شده توسط گیاه تابعی از غلظت کادمیم در خاک است (کوکس و هاچینسون، 1980). در مطالعه‌ای که وانگ و همکاران (2017) در مورد انباشتگی فلزهای سنگین در گندم و ذرت انجام دادند، انباشتگی هفت فلز شامل روی، مس، سرب، کادمیم، کروم، آرسنیک و جیوه در سیستم‌های خاک-ذرت و خاک-گندم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تجمع این فلزها در گندم بیشتر از ذرت بود.

وسعت زیادی از خاک‌های کشاورزی جهان به دلیل استفاده دراز مدت از کودهای فسفاته، لجن فاضلاب و غیره به غلظت‌های کم تا متوسط کادمیم آلوده شده‌اند (واسیلو وهمکاران، 2002). در اراضی کشاورزی کشور طی 40 سال گذشته به‌طور متوسط بین 100 تا 300 کیلوگرم کود فسفاته به ازای هر هکتار مصرف شده است که مقدار کادمیم استخراج شده کود توسط اسید نیتریک به ازای هر کیلوگرم فسفر ،50 میلی‌گرم بوده است (جلالی و خانلری، 2008). به‌عبارت دیگر، در طی چهار دهه گذشته به ازای هر هکتار از اراضی کشاورزی، بین 200 تا 600 گرم کادمیم تنها از طریق کاربرد کودهای فسفاته وارد خاک‌های زراعی شده است. طبق آمار، مقدار توزیع (شامل واردات و تولید) کودهای فسفاته در سال 1388 در کشور رقمی بالغ بر 737 هزار و 859 تن بوده است (بی‌نام، 1393) که با احتساب مقدار متوسط و خوش بینانه 25 میلی‌گرم کادمیم به ازای هر کیلوگرم کود فسفاته (هر کیلوگرم کود فسفاته به‌طور متوسط تا 170 میلی‌گرم کادمیم می‌تواند داشته باشد (کاباتا-پندیاس، 2001) و با فرض مرغوب بودن سنگ فسفات اولیه، در سال 88 مقدار 18 هزار و 447 کیلوگرم کادمیم از طریق کودهای فسفاته به ناچار وارد اراضی کشاورزی شده است. روندی که

[1] Antioxidant

سال‌ها ادامه داشته است. یکی از راه‌های آلودگی محیط‌زیست و منابع خاک و آب به فلزات سنگین، مصرف نهاده‌های کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی و معدن‌کاوی و هم‌چنین هم‌جواری اراضی شهری و مسکونی با شهرک‌های صنعتی و کارخانه‌های فرآوری فلزات سنگین می‌باشد. استان زنجان به واسطه دارا بودن معادن متعدد و فعالیت‌های گسترده معدن‌کاوی و ذوب فلز در آن، یکی از استان‌های آلوده از لحاظ منابع خاک و آب به فلزهای سنگین و مخصوصاً فلزهای سنگین سرب، روی و کادمیم به‌حساب می‌آید. پهنه‌بندی فلز کادمیم با استفاده از کریجینگ معمولی نشان داد که غلظت فلز سنگین کادمیم در بیشتر اراضی نیمه شرقی و مرکزی منطقه زنجان بالای حد آستانه خطر قرار دارد (عبداللهی و همکاران 1391؛ یاری و همکاران، 1395). فرهمندکیا و همکاران (1388) میزان ترسیب فلزهای سنگین از طریق ریزش‌های جوی را برای شهر زنجان به این صورت گزارش کردند، سرب 0/082، روی 0/286، کادمیم 0/018 و کروم 0/009 میلی‌گرم بر مترمربع در روز. آن‌ها اشاره کردند که منابع صنعتی منتشر کننده فلزهای سنگین نقش مستقیمی در ترسیب فلزهای سنگین به‌صورت ریزش‌های جوی خشک و تر دارند.

نتایج حاصل از ارزیابی میزان آلودگی زمین‌های مرکزی استان زنجان به فلزهای سنگین با استفاده از شاخص‌های آلودگی از قبیل فاکتور غنی شدگی[1] (EF)، شاخص زمین انباشت[2] (Igeo)، شاخص آلودگی[3] (PI) و پتانسیل خطر زیست‌محیطی[4] (RI) در منطقه‌ای به وسعت 2000 کیلومتر مربع نشان داد که فلزهای آهن، منگنز، کروم، کبالت و نیکل دارای حداقل مقدار سمیت و خطر زیست‌محیطی هستند که به‌نظر می‌رسد غلظت این گروه بیش‌تر متأثر از فرایندهای طبیعی و زمین‌شناختی در منطقه باشند، در حالی‌که فلزهای سرب، روی، کادمیم و تا حدودی مس دارای غلظت‌های بالاتر نسبت به غلظت زمینه هستند و خطر زیست‌محیطی بیش‌تری نسبت به فلزهای دیگر دارند، چون غلظت این فلزها در منطقه بیش‌تر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر خاک‌های با کاربری شهری نسبت به خاک‌های با کاربری‌های مرتع و کشاورزی در ردیف خاک‌های دارای خطر زیست‌محیطی بالا قرار گرفت که با توجه به آن، کاربری شهری از پتانسیل خطر زیست‌محیطی بالایی برای ساکنان برخوردار بود. هم‌چنین خطرپذیری ناشی از آلودگی عناصر سنگین در خاک‌های شهری (زنجان و سلطانیه) و هم‌چنین اطراف مرکزهای صنعتی (کارخانه سرب و روی و مجتمع های صنعتی) بیش‌تر از خاک‌های مناطق اطراف بود (افشاری و همکاران، 1394). در پهنه‌بندی زمین‌های شهر زنجان از لحاظ میزان آلودگی، مشاهده پهنه‌های با بیش‌ترین شاخص بار آلودگی فلزهای سنگین در زمین‌های مجاور شهرک روی زنجان، به‌روشنی نقش فعالیت‌های صنعتی مربوط به فرآوری فلز روی در ورود هم‌زمان چند نوع عنصر سنگین به خاک‌های اطراف و تنزل کیفیت زمین‌های مجاور شهرک را اثبات نموده است (صفری و همکاران، 1395). در بررسی صورت گرفته روی 126 نمونه خاک که از اطراف کارخانه سرب و روی زنجان برداشت شده بود، مشخص گردید برای فلز کادمیم لکه‌های با غلظت کم نسبت به لکه‌های با غلظت بالا از تراکم بالاتری برخوردار بودند.

وجود لکه‌های با غلظت بالا در اطراف کارخانه سرب و روی زنجان، مبین تأثیر بیش‌تر این صنعت بر روی توزیع مکانی فلز کادمیم می‌باشد. هم‌چنین میزان تمرکز کادمیم حاکی از پراکندگی نسبتاً کم این عنصر در منطقه است. بنابراین می‌توان تأثیرپذیری این عنصر از کارخانه را امری مهم در توزیع مکانی آن در منطقه دانست (خسروی و همکاران، 1396). اخوان و گلچین (1398) با نمونه‌برداری دو پسماند متفاوت از محل انباشت پسماندهای کارخانه سرب روی زنجان، پس از بخش‌بندی شیمیایی و ارزیابی خطر زیست‌محیطی گزارش کردند که پسماندهای مورد آزمایش خطر آلودگی بسیار بالایی برای محیط زیست دارند و به راحتی می‌توانند سلامت انسانی را به خطر اندازند. با توجه به نقش برجسته گندم در سبد غذایی خانوارهای ایرانی و سهولت جذب و سمیت زیاد فلز کادمیم برای گیاهان که عملکرد را به شدت کاهش می‌دهد و باعث ایجاد مشکلات بهداشتی در انسان بعد از ورود به جیره غذایی می‌گردد، لذا لازم است رقم‌هایی از گندم برای کاشت در مناطق آلوده مشابه با استان زنجان استفاده شود که عملکرد آن‌ها کم‌تر تحت تأثیر آلودگی خاک قرار می‌گیرد. به همین دلیل آزمایش حاضر با هدف بررسی تأثیر کادمیم بر رشد و عملکرد تعدادی از رقم‌های قابل کشت گیاه گندم در استان زنجان در شرایط گلخانه‌ای انجام گردید تا بتوان رقم‌هایی مناسب برای کشت در این منطقه انتخاب نمود.

1. Enrichment factor
2. Index geoaccumulation
3. Pollution index
4. Potential ecological risk

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر کادمیم بر برخی از شاخص‌های رشد و غلظت عناصر غذایی در رقم‌های مختلف گیاه گندم یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال‌های 96-97 در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان به اجرا درآمد. تیمارها شامل پنج سطح آلودگی خاک به کادمیم (صفر، 10، 25، 50 و 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم (خداوردیلو و همکاران، 2012) از منبع کادمیم سولفات $[3Cd(SO_4).8H_2O]$ (عبداللهی و گلچین،1397) و چهار رقم گندم (اوروم، پیشگام، زارع و میهن) بودند که در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. بنابراین 20 تیمار و با لحاظ نمودن سه تکرار در مجموع 60 واحد آزمایشی وجود داشت. هر واحد آزمایشی از یک گلدان حاوی پنج کیلوگرم خاک تشکیل شده بود که در آن تعداد 12 عدد بذر گندم از رقم‌های ذکر شده به‌طور جداگانه کشت شد. با توجه به این‌که سولفات کادمیم به علت داشتن آنیون سولفات که محدودیت کم‌تری نسبت به سایر آنیون‌ها مانند کلر، ایجاد می‌کند از این نمک برای آلوده کردن خاک به کادمیم استفاده گردید (عبداللهی و گلچین، 1397).

نحوه آلوده کردن خاک بدین صورت بود که ابتدا برای هر سطح آلودگی مقدار نمک سولفات کادمیم محاسبه و پس از توزین، در 500 میلی‌لیتر آب مقطر حل و بر روی نمونه خاک پنج کیلوگرمی به‌طور کامل و یکنواخت اسپری گردید. بعد از خشک شدن، نمونه‌های تیمار شده را در گلدان‌های پلاستیکی ریخته و بعد از برچسب زدن، گلدان‌ها با افزودن آب مقطر به رطوبت ظرفیت زراعی (FC) رسانیده شدند و وزن نهایی گلدان‌ها یادداشت گردید (عبداللهی و گلچین، 1397). سپس برای به تعادل رسیدن خاک‌های تیمار شده در گلدان‌ها به مدت دو ماه دوره‌های تر و خشک شدن در رطوبت ظرفیت مزرعه و دمای 25 درجه سلسیوس اجرا گردید. پس از گذشت مدت زمان خوابانیدن، 12 عدد بذر گندم از رقم‌های اوروم، پیشگام، زارع و میهن در هر گلدان کاشته شد. هر چهار رقم مورد مطالعه در این پژوهش مناسب برای کشت در شرایط آبی و تنش خشکی آخر فصل و مناطق سرد کشور می‌باشند. همچنین ارقام مورد مطالعه به خوابیدگی بوته مقاوم هستند. درصد میانگین پروتئین دانه در ارقام زارع، پیشگام، اوروم و میهن به ترتیب 11/4، 11/2، 11/1 و 11 برابر است (بی‌نام، 1394).

برای انتخاب خاک مورد نظر جهت اجرای آزمایش، یک نمونه مرکب خاک (از عمق صفر تا 20 سانتی‌متری اراضی اطراف پژوهشکده دانشگاه زنجان) تهیه و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن از قبیل غلظت قابل جذب عنصر کادمیم (لیندسی و نورول، 1978)، نیتروژن کل (برمنر، 1996)، فسفر قابل جذب (اولسن و همکاران، 1954)، پتاسیم قابل جذب (هلمکه و اسپارک، 1996)، غلظت عناصر غذایی کم مصرف (پیج، 1982)، واکنش خاک (توماس، 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (رودس، 1996)، ماده آلی خاک (والکلی وبلک، 1934)، کربنات کلسیم معادل (لئوپرت و سوارز، 1996) و بافت خاک (بوویوکس، 1962) اندازه‌گیری شدند.

در طی دوره رشد، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر در حد رطوبت ظرفیت مزرعه انجام شد. برای این کار گلدان‌ها در فاصله زمانی هر دو روز یک‌بار توزین و آب از دست رفته تا رسیدن گلدان‌ها به وزن نهایی (رطوبت ظرفیت مزرعه) به گلدان‌ها اضافه گردید. بعد از گذشت سه ماه، در پایان رشد رویشی و قبل از به خوشه رفتن گیاه، بخش‌های هوایی و ریشه گیاه به‌طور جداگانه برداشت و وزن تر آن‌ها در هر واحد آزمایشی اندازه‌گیری شدند. قسمت‌های مختلف گیاه بعد از انتقال به آزمایشگاه توسط آب مقطر شسته و در آون به مدت 48 ساعت در دمای 60 درجه سلسیوس خشک گردیدند. قابل ذکر است برای شستشوی ریشه از محلول 0/01 درصد کالگون و دستگاه آلتراسوند استفاده گردید. قبل از برداشت گیاه، ارتفاع بوته از سطح گلدان تا مریستم انتهایی گیاه توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد. شاخص کلروفیل برگ بر روی برگ‌های کاملاً توسعه یافته در حد فاصل رگبرگ میانی و حاشیه برگ انجام و میانگین قرائت 12 برگ در هر گلدان به عنوان متوسط قرائت شاخص کلروفیل برگ برای آن واحد آزمایشی در نظر گرفته شد (SPAD-502, Minolta, japan). غلظت کادمیم و عناصر غذایی موجود در عصاره حاصل از هضم تر با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید (علی‌احیایی و بهبهانی‌زاده، 1372). داده‌های به‌دست آمده از آزمایش به کمک نرم افزار آماری SAS 9.1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک و پنج درصد و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از اعمال تیمارها در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- برخی ویژگی‌های مهم فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از اعمال تیمارها

عمق	pH	EC	TNV	OC	FC	N_t	K_{av}	P_{av}	Fe_{av}	Cd_{av}	بافت
(cm)		($dS.m^{-1}$)	(%)				($mg.kg^{-1}$)				
20-0	7/8	0/9	11/9	0/6	21	0/3	460	11	8	0/42	لوم‌شنی

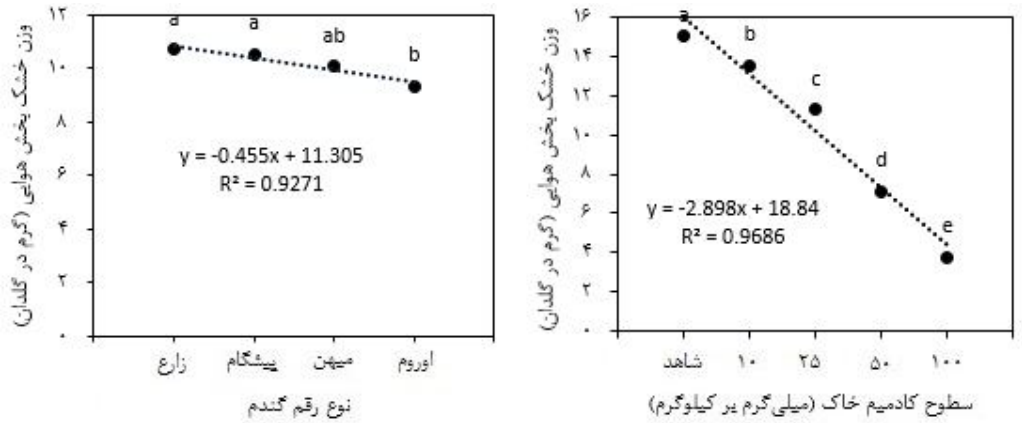
نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر برخی صفات مورد مطالعه نشان می‌دهد که تأثیر این تیمارها بر صفات اندازه‌گیری شده شامل وزن تر و خشک بخش‌هوایی، ارتفاع بوته، شاخص کلروفیل برگ و وزن تر و خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنادار بود. ولی اثر متقابل سطوح آلودگی خاک به کادمیم و نوع رقم گندم بر وزن خشک بخش هوایی معنادار نبوده و بر شاخص کلروفیل برگ و وزن تر ریشه در سطح احتمال پنج درصد ($P<0.05$) معنادار شد (جدول 2).

جدول 2- نتایج تجزیه واریانس سطوح آلودگی کادمیم، نوع رقم گندم و اثر متقابل آن‌ها بر برخی صفات مورد مطالعه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن تر	وزن خشک	ارتفاع بوته	شاخص کلروفیل برگ	وزن تر	وزن خشک
		بخش هوایی				ریشه	
سطوح آلودگی خاک	4	4515/93**	260/51**	195/12**	395/86**	2/09**	0/17**
نوع رقم گندم	3	303**	5/56**	24/58**	19/54**	0/02**	0/016**
سطوح آلودگی خاک x نوع رقم	12	101/55**	0/81ns	13/5**	1/66*	0/005*	0/003**
خطا	40	24/8	1/02	1/34	0/6	0/003	0/0007
ضریب تغییرات (%)	-	10/81	9/93	2/76	5/05	6/19	11/63

** و * به ترتیب در سطح ٪1 و ٪5 معنادار و ns اختلاف معنادار نیست.

مقایسه میانگین‌های تأثیر سطوح مختلف کادمیم خاک بر وزن خشک بخش هوایی نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم خاک وزن خشک بخش هوایی گیاه گندم کاهش یافت. به‌طوری‌که در سطح 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک وزن خشک بخش هوایی 74/92 درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (شکل 1). هم‌چنین مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع رقم گندم بر وزن خشک بخش هوایی نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین وزن خشک بخش هوایی گیاه گندم به ترتیب با میانگین‌های 10/71 و 9/34 گرم در گلدان مربوط به رقم زارع و رقم اوروم بود. اما تفاوت معنی‌داری از نظر آماری بین وزن خشک بخش هوایی رقم‌های زارع، پیشگام و میهن وجود نداشت (شکل 1).



شکل 1- تأثیر نوع رقم گندم و سطوح مختلف کادمیم خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر وزن خشک بخش هوایی گیاه گندم

مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح کادمیم خاک و نوع رقم گندم نشان داد که بیش‌ترین وزن تر بخش هوایی به ترتیب با میانگین‌های 85/73 و 75/64 گرم در گلدان در رقم‌های پیشگام و میهن و تیمار شاهد (بدون کادمیم)، بیش‌ترین ارتفاع بوته (49/21 سانتی‌متر) در رقم پیشگام و تیمار شاهد، بیش‌ترین وزن تر ریشه به ترتیب با میانگین‌های 1/36 و 1/33 گرم در بوته در رقم‌های پیشگام و اوروم و تیمار شاهد و بیش‌ترین وزن خشک ریشه (0/51 گرم‌دربوته) در رقم اوروم و تیمار شاهد به دست آمد (جدول 3). کم‌ترین وزن تر بخش هوایی و کم‌ترین وزن خشک ریشه در همه رقم‌ها و سطح 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری با هم نداشتند. کم‌ترین ارتفاع بوته (30/47 سانتی‌متر) و کم‌ترین وزن تر ریشه (0/23 گرم در بوته) در رقم میهن و سطح 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین شاخص کلروفیل برگ (4/24) در رقم زارع و سطح 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به دست آمد (جدول 3).

غلظت بالای کادمیم با ایجاد برهم‌کنش با سایر عناصر غذایی باعث کاهش جذب عناصر کم‌مصرف شده و با ایجاد ترکیب فسفات کادمیم و نیترات کادمیم جذب عناصر پرمصرف را نیز کاهش می‌دهد و با کاهش شاخص‌های رشد، کاهش عملکرد را در پی دارد (بناویدس و همکاران، 2005). شیرازی و همکاران (1391) گزارش کردند که با افزایش سطح کادمیم، میانگین وزن تر شاخساره رقم‌های برنج نسبت به تیمار شاهد به‌طور معناداری کاهش یافت. نتایج آزمایش یعقوب زاده و همکاران (1390) نشان داد که اثر سطوح کادمیم بر صفات مورفولوژیکی گیاه معنادار بود و بیش‌ترین ارتفاع گیاه مربوط به تیمار شاهد (بدون کادمیم) و کم‌ترین میزان ارتفاع بوته مربوط به غلظت 400 میلی‌گرم نیترات کادمیم در کیلوگرم خاک به دست آمد. بررسی‌ها نشان داده است که کادمیم سبب کاهش مقدار کلروفیل کل، a و b و کاروتنوئیدها در گیاهان عالی می‌شود (سینگ و میر، 1998). سمیت کادمیم ناشی از اختلالاتی است که کادمیم در فعالیت آنزیم‌ها ایجاد می‌کند، کادمیم از تشکیل آنتوسیانین و رنگدانه‌های کلروفیل ممانعت می‌نماید و اثر منفی و مخربی را بر گیاه می‌گذارد (جیانگ و همکاران، 2001). بررسی‌های گونگ و همکاران (2003) نشان داد که کادمیم باعث کاهش میزان فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای می‌شود. کاهش هدایت روزنه‌ای میزان دسترسی سلول‌های فتوسنتز کننده را به دی‌اکسیدکربن به عنوان فاکتور اصلی اجزای فتوسنز کننده کاهش می‌دهد که برآیند آن عدم تأمین متابولیت‌های مورد نیاز برای رشد و نمو سلول‌های گیاهی است. به علاوه اختلال در اجرای فتوسنتز و تثبیت نیتروژن از دیگر اثرات منفی کادمیم است که می‌تواند منجر به کاهش ماده خشک گردد. نتایج بررسی اصغری‌پور و همکاران (2011) بر روی بذور رقم‌های گندم روشن و امید نشان داد که با افزایش کادمیم درصد جوانه‌زنی بذر، میانگین زمان جوانه‌زنی بذر، وزن خشک گیاهچه، طول ریشه و ارتفاع ساقه کاهش پیدا کردند. حساسیت برخی از پارامترهای گندم به سمیت کادمیم به این ترتیب گزارش شد: طول عمر ریشه> ارتفاع ساقه> جوانه زنی بذر. شیخ و همکاران (2013) با مطالعه بر روی تأثیر سمیت کروم، کادمیم، روی و منگنز بر روی گندم گزارش کردند که فلزات فوق از طریق کاهش جوانه‌زنی بذر، کاهش طول ریشه و ساقه بر رشد طبیعی گندم اثر می‌گذارند.

جدول 3- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح مختلف کادمیم خاک و نوع رقم گندم بر شاخص‌های مورد مطالعه در گیاه گندم

سطوح کادمیم ($mg.kg^{-1}$)	نوع رقم گندم	وزن تر بخش هوایی (g/pot)	ارتفاع بوته (cm)	شاخص کلروفیل برگ	وزن تر ریشه (g/plant)	وزن خشک ریشه (g/plant)	غلظت فسفر بخش هوایی (%)	غلظت پتاسیم بخش هوایی (%)
شاهد	زارع	59/75bc	44/28cde	20/14bc	1/3ab	0/36 b	0/48 a	3/85 a
	پیشگام	85/73a	49/21a	21/37 ab	1/36 a	0/32 bcd	0/49 a	3/88 a
	میهن	75/64a	45/92bc	21/94 a	1/22 bc	0/34 bc	0/48 a	3/56 b
	اوروم	58/02 cdef	44/99cd	22/4 a	1/33 a	0/51 a	0/48 a	3/75 a
10	زارع	56/26 cdef	43/07def	17/84d	1/09 d	0/31 bcde	0/44 b	3/28 cd
	پیشگام	59/75cd	48/46ab	19/61 c	1/18c	0/27 cdef	0/47 ab	3/37 c
	میهن	58/99cde	45/14cd	19/44 c	1/07 d	0/28 cdef	0/39 cd	3/17 d
	اوروم	47/23 efgh	42/67def	19/26 c	1/06 de	0/34 bc	0/4 c	3/22 cd
25	زارع	46/27fgh	42/77def	13/67g	0/95 fg	0/25 efg	0/35 de	2/92 e
	پیشگام	48/29 defg	41/83ef	16/33 ef	0/98 ef	0/2 gh	0/40c	2/92 e
	میهن	50/43defg	42/01ef	17/71d	0/97 ef	0/21 fgh	0/33 ef	2/7 f
	اوروم	42/25 ghi	42/50def	16/85de	0/88 g	0/26 def	0/33 ef	2/64 fg
50	زارع	38/14 ghi	40/67fg	12/57 g	0/56 h	0/15 hi	0/29 fgh	2/54 fgh
	پیشگام	42/79 gh	40/15fghi	13/58g	0/58 h	0/13 ij	0/31 efg	2/64 fg
	میهن	35/51 hij	38/81ghi	15/22f	0/45 i	0/13 ij	0/28 ghi	2/47 gh
	اوروم	30/60ijk	40/52fgh	12/48g	0/6 h	0/17 hi	0/26 hi	2/47 gh
100	زارع	19/37 kl	37/42i	4/24 i	/3 jk	0/09j	0/24 i	2/44 h
	پیشگام	19/69kl	38/17ghi	7/16 h	0/32 j	0/08 j	0/27 ghi	2/47 gh
	میهن	15/10 l	30/47j	7/35 h	0/23 k	0/08 j	0/19 j	1/93 j
	اوروم	24/85 jkl	37/81hi	7/58h	0/25 jk	0/09 j	0/17 j	2/19 i

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند از نظر آماری با هم اختلاف معناداری ندارند.

غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و مس بخش هوایی

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت عناصر مورد مطالعه نشان می‌دهد که تأثیر این تیمارها بر غلظت‌های نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و مس بخش هوایی گیاه گندم در سطح احتمال یک درصد ($P<0.01$) معنادار بود. اما اثر متقابل سطوح آلودگی خاک به کادمیم و نوع رقم گندم بر غلظت‌های نیتروژن، آهن و مس معنادار نبود (جدول 4).

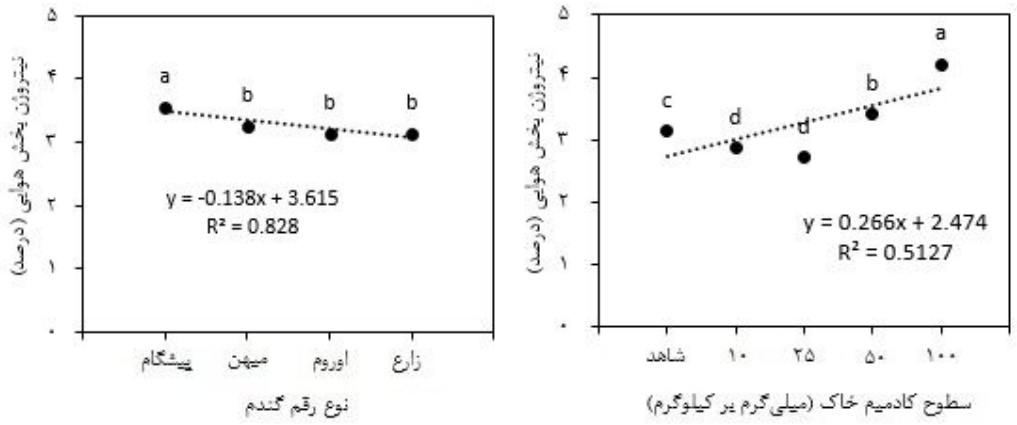
جدول 4- نتایج تجزیه واریانس تأثیر سطوح آلودگی کادمیم، نوع رقم گندم و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت برخی عناصر بخش هوایی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		غلظت نیتروژن	غلظت فسفر	غلظت پتاسیم	غلظت آهن	غلظت مس
سطوح کادمیم	4	4/12**	0/14**	4/26**	80206/92**	87/83**
نوع رقم گندم	3	0/57**	0/01**	0/27**	3654/84**	10/79**
سطوح کادمیم × نوع رقم گندم	12	0/04 ^{ns}	0/001**	0/02**	755/38 ^{ns}	1/1 ^{ns}
خطای آزمایش	40	0/02	0/0003	0/005	499/55	1/2
ضریب تغییرات (%)	-	4/46	5/38	2/37	5/46	11/71

** و * به ترتیب در سطح ٪1 و ٪5 معنادار و ^{ns} اختلاف معنادار نیست.

با افزایش غلظت کادمیم خاک، غلظت نیتروژن بخش هوایی تا سطح 25 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک کاهش یافت. به‌طوری‌که در غلظت 25 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک غلظت نیتروژن بخش هوایی 13/65 درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان دادند ولی در سطوح 50 و 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک غلظت نیتروژن بخش هوایی به ترتیب 8/25 و 33/65 درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافتند (شکل 2). علت افزایش نیتروژن بخش هوایی در غلظت های 50 و 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک را می‌توان به اثر رقت نسبت داد. همان‌طور که اشاره شد افزایش غلظت کادمیم خاک سبب کاهش وزن گیاه گندم شد و این عامل سبب می‌شود در غلظت‌های 50 و 100 میلی‌گرم کادمیم، نیتروژن بیش‌تری در ازای میزان بافت کم‌تر وجود داشته باشد. هم‌چنین بیش‌ترین غلظت نیتروژن بخش هوایی گیاه گندم با میانگین 3/55 درصد مربوط به رقم پیشگام بود. اما تفاوت معنی‌داری از نظر آماری بین غلظت نیتروژن بخش هوایی رقم‌های میهن، زارع و اوروم وجود نداشت (شکل 2).

نیتروژن یکی از عناصر پرمصرف گیاه است. کادمیم به علت آسیب زدن به جمعیت میکروبی خاک و اختلال در فرایند معدنی شدن نیتروژن می‌تواند آثار منفی بر جذب نیتروژن در گیاه داشته باشد (داسک، 1995). هرناندز و همکاران (1997) کاهش غلظت و جذب نیترات در شاخساره نخودفرنگی آلوده به کادمیم را به کاهش فعالیت نیترات ردکتاز در شاخساره گیاه نسبت دادند. حسن‌دار و میشرا (1994) نشان دادند که افزایش 25 تا 50 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک سبب کاهش معدنی شدن نیتروژن آلی و زیست‌توده میکروبی در خاک شد. ناروال و همکاران (1993) کاهش جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، مس و سدیم توسط ریشه ذرت در حضور کادمیم را گزارش کردند.



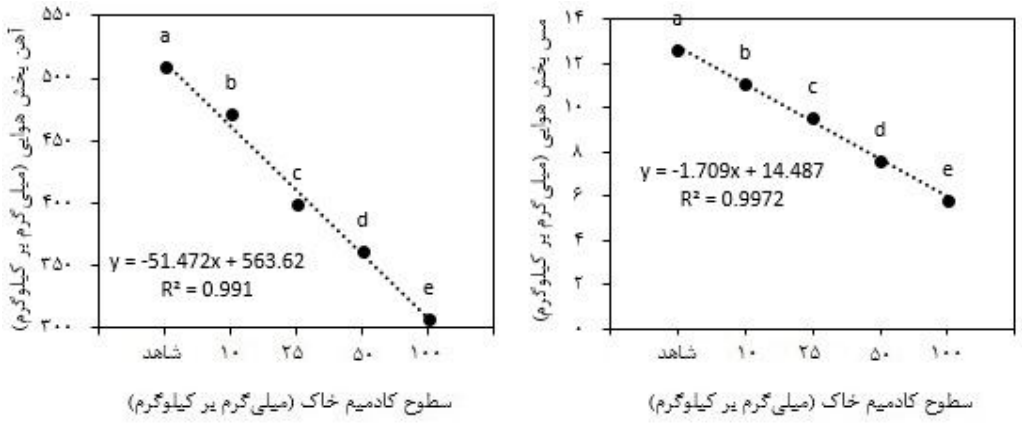
شکل 2- تأثیر نوع رقم گندم و سطوح مختلف کادمیم خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر غلظت نیتروژن بخش هوایی

مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل سطوح کادمیم خاک و نوع رقم گندم بر فسفر و پتاسیم بخش هوایی نشان داد که بیش‌ترین غلظت فسفر و پتاسیم بخش هوایی در تیمار شاهد (بدون کادمیم) همه رقم‌ها اندازه‌گیری شد.کم‌ترین غلظت فسفر بخش هوایی (0/24 درصد) از رقم زارع و کمترین غلظت پتاسیم بخش هوایی (1/93 درصد) از رقم میهن و سطح 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک به دست آمد (جدول3).

یانگ و همکاران (1998) بیان کردند افزودن کادمیم به محیط رشد کلم، چاودار، ذرت و شبدر سفید، کاهش عملکرد و افزایش تجمع فسفر در ریشه را به دنبال داشته است. با این حال غلظت فسفر در بخش هوایی در تمام سطوح کادمیم خاک بیشتر از غلظت فسفر در ریشه گیاه گندم بود. گادبولد و هاترمن (1985) گزارش کردند که سمیت کادمیم ممکن است سبب بروز کمبود فسفر در گیاه شود. مک لاگلین و همکاران (1999)، دنیس (2000) و حقیری (1973) بیان کردند که سمیت کادمیم ممکن است باعث کمبود فسفر یا بروز مشکلات مربوط به انتقال فسفر در گیاه گردد. ابوال کاشم و کاوایی (2007) بیان کردند که کادمیم و فسفر با یکدیگر برهمکنش منفی داشته و سمیت کادمیم سبب کاهش غلظت فسفر در شاخساره و تجمع آن در ریشه گیاه شد. نتایج لورنز و همکاران (2006) نشان می‌دهد که عناصر سمی مانند کادمیم بر فعالیت‌های میکروبی خاک تأثیر منفی داشته، سبب

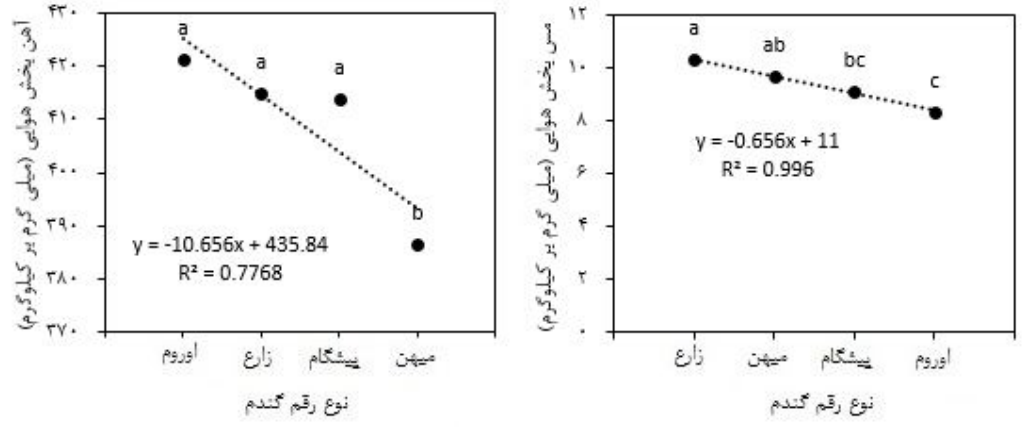
غیرفعال شدن آن‌ها و درنهایت منجر به مختل شدن چرخه عناصر غذایی می‌شوند. ناروال و همکاران (1993) کاهش جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، مس و سدیم توسط ریشه ذرت در حضور کادمیم را گزارش کردند. نوسیتو و همکاران (2002) بیان کردند که کادمیم جذب پتاسیم توسط ریشه را کاهش داد اما بر جذب فسفر تأثیری نداشت.

مقایسه میانگین‌های تأثیر سطوح مختلف کادمیم خاک بر غلظت آهن و مس بخش هوایی گیاه گندم نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم خاک، غلظت این عناصر نیز به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. به‌طوری‌که در سطح 100 میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک غلظت آهن و مس بخش هوایی به ترتیب 39/70 و 53/88 درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (شکل 3).



شکل 3- تأثیر سطوح مختلف کادمیم خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر غلظت آهن و مس بخش هوایی

بیش‌ترین غلظت آهن بخش هوایی با میانگین 421/56 میلی‌گرم برکیلوگرم از رقم اوروم به دست آمد در حالی‌که تفاوت معنی‌داری از نظر آماری با ارقام پیشگام و زارع نداشت. بیش‌ترین غلظت مس بخش هوایی نیز از رقم زارع (10/33 میلی‌گرم بر کیلوگرم) به دست آمد (شکل 4).



شکل 4- تأثیر نوع رقم بر غلظت آهن و مس بخش هوایی

کادمیم اساساً در تحرک و انتقال عناصر کم‌مصرف به برگ‌ها دخالت دارد (ساندیلوو همکاران،2001). در برنج که در حضور کادمیم رشد یافته بود، غلظت آهن، منگنز و مس در بخش هوایی کاهش یافت (گاسرسون و همکاران، 1996). به‌طورکلی دلیل این امر تشابه خواص فیزیکی و شیمیایی کادمیم با کاتیون‌های دو ظرفیتی است (آرویند و پراسد، 2005). عبدالصبور و همکاران (1988) بیان کردند که کادمیم منجر به بروز مشکلات ناشی از انتقال روی و

سایر عناصر کم مصرف در گیاه می‌شود به‌طوری‌که در مواردی که گیاه با مسمومیت کادمیم مواجه شود از غلظت و میزان جذب عناصر کم مصرف در گیاه کاسته شده و در مواردی مرگ گیاه را به دنبال خواهد داشت. حقیری (1973) گزارش کرد که غلظت زیاد کادمیم در محیط رشد، جذب عناصر کم مصرف را توسط گیاه به دلیل کاهش سطح، توسعه ریشه و کاهش متابولیسم گیاه مختل می‌کند.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مشاهده گردید که با افزایش غلظت کادمیم خاک وزن تر و خشک بخش هوایی، ارتفاع بوته، شاخص کلروفیل برگ، وزن تر و خشک ریشه، غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و مس بخش هوایی هر چهار رقم گندم کاهش یافتند. البته میزان کاهش در رقم‌های مورد مطالعه در این پژوهش متفاوت بود. به‌طور کلی می‌توان گفت از بین رقم‌های مورد مطالعه رقم‌های پیشگام و اوروم کمترین حساسیت و رقم میهن بیشترین حساسیت را نسبت به فلز کادمیم داشته است. با این حال تمام رقم‌های کاهش چشم‌گیری در عملکرد و غلظت عناصر پرمصرف و کم مصرف بخش هوایی در حضور سطوح بالای کادمیم داشتند که این امر اهمیت بررسی خاک‌های تحت کشت گیاه گندم که امکان آلودگی به فلزهای سنگین را دارند بیشتر نمایان می‌کند.

فهرست منابع:

1. اخوان، ا.، ا. گلچین. 1398. بخش‌بندی شیمیایی و ارزیابی خطر زیست‌محیطی سرب در پسماندهای معدن سرب-روی. تحقیقات آب و خاک ایران، (9)50: 2322-2303.
2. افشاری،ع.، ح. خادمی، و س. حجتی. 1394. ارزیابی پتانسیل خطرپذیری آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های مرکزی استان زنجان بر اساس شاخص‌های آلودگی .پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (6)22: 40-21.
3. بی‌نام. 1393. آمارنامه جهاد کشاورزی. سال زراعی 89-1388. وزارت کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و کشاورزی. تهران ایران، 71 صفحه.
4. بی‌نام. 1394. موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. 1394. معرفی ارقام زراعی (امنیت و سلامت غذایی، جلد1). قابل دسترس در http: // www.areeo.ac.ir.
5. جعفرنژادی، ع.، م. همایی، غ. ع. صیاد و م. بای بوردی. 1391. ارزیابی ویژگی‌های مؤثر خاک بر وضعیت غلظت کادمیم در خاک و بذر گندم در برخی خاک‌های آهکی خوزستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (2)19: 149-164.
6. جوادزرین، ا.، و ب. متشرع زاده. 1394. تاثیر کادمیم بر غلظت عناصر مس، آهن، منگنز و روی در اندام هوایی ارقام مختلف گندم. به زراعی کشاورزی، (1)17: 41-27.
7. خسروی، ی.، ع. زمانی، ع. پری زنگنه، و م. ر. یافتیان. 1396. بررسی پراکنش فلزهای سنگین در خاک‌های اطراف کارخانه سرب و روی زنجان .پژوهش های خاک (علوم خاک و آب)، (4)31: 639-627.
8. سلطانی، ف.، م. ل. قربانلی، و خ. منوچهری کلانتری. 1385. اثر کادمیم بر مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، قندها و مالون آلدئید در گیاه کلزا. مجله زیست شناسی ایران، (2)19: 145-136.
9. شیرازی، ص. ص.، ع. رونقی، ن. کریمیان، ج. یثربی، و ی. امامی. 1391. اثر سمیت کادمیم بر جذب نیتروژن و فسفر و برخی از ویژگی‌های رویشی شاخساره هفت رقم برنج. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، (9)3: 72-57.
10. صفری، ی.، م. ا. دلاور، ع. اسفندیارپور بروجنی، م. ح. صالحی، و ح. ر. اولیایی. 1395. ارزیابی وضعیت فلزات سنگین در منطقه‌ی شهرک صنعتی روی زنجان به کمک شاخص بار آلودگی. مدیریت خاک و تولید پایدار، (2)6: 119-133.
11. عبداللهی، س.، م. ا. دلاور، و پ. شکاری. 1391. پهنه‌بندی توزیع مکانی سرب، روی و کادمیم و ارزیابی آلودگی خاک‌های منطقه انگوران، استان زنجان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع غذایی)، (6)26: 1420-1410.
12. عبداللهی، س.، و ا. گلچین. 1397. مقایسه توان تولید زیست‌توده و جذب و انتقال کادمیم در سه رقم کلم .تحقیقات آب و خاک ایران، (2)49: 259-243.

13. علی‌احیایی، م.، و ع. ا. بهبهانی‌زاده. 1372. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک و گیاه، موسسه تحقیقات خاک و آب تهران، نشریه فنی شماره 893.

14. فرهمندکیا، ز.، م. ر. مهراسبی،م. ص. سخاوتجو، م. ا. ش. حسنعلی زاده مظهر، و ز. رمضان‌زاده. 1388. بررسی فلزات سنگین درذرات راسب شونده از هوای شهر زنجان. سلامت و محیط‌زیست، (4)2: 249-240.

15. یاری، ی.، ح. ر. ممتاز، و م. طاهری. 1395. توزیع مکانی برخی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه صنعتی زنجان. دانش آب و خاک، (4)26: 236-223.

16. یعقوب‌زاده، ف.، د. ارادتمند، و م. یوسفی‌راد.1390. مقایسه دو گیاه آفتابگردان و ذرت در گیاه پالایی کادمیم از خاک. اولین کنگره ملی علوم و فناوری‌های نوین کشاورزی دانشگاه زنجان، 4-1.

17. Abdel-Sabour, M. F., J. J. Mortvedt, and J. J. Kelsoe. 1988. Cadmium-zinc interactions in plants and extractable cadmium and zinc fractions in soil. Soil Science, 145(6): 424-431.

18. Aravind, P. and M. N. V. Prasad. 2005. Cadmium zinc interactions in a hydroponic system using Ceratophyllum demersum L: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. Brazilian Journal of Plant Physiology, 17(1): 3-20.

19. Asgharipour, M. R., M. Khatamipour, and M. Razavi-Omrani. 2011. Phytotoxicity of cadmium on seed germination, early growth, proline and carbohydrate content in two wheat varieties. Advances in Environmental Biology, 5(4): 559-565.

20. Benavides, M., P. S. M. Gallego, and M. L. Tomaro. 2005. Cadmium toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology, 17(1): 21-34.

21. Bolan, N. S., D. C. Adriano, P. A. Mani, and A. Duraisamy. 2003. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. Plant and Soil, 251(2): 187-198.

22. Bouyoucos, C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agronomy Journal, 54: 464-465p.

23. Bremner, J. M. 1996. Nitrogen-total. In: Sparks, D. L. et al., Method of soil analysis. Published by Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. (pp. 1085-1122).

24. Chaney, R. L., and S. B. Hornick. 1978. Accumulation and effects of cadmium on crops. In Edited Proc. First International Cadmium Conference, (pp. 125-140).

25. Christensen, T. H. 1984. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. Water, Air, and Soil Pollution, 21(1): 105-114.

26. Cox, R. M. and T. C. Hutchinson. 1980. Multiple metal tolerances in the grass *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. from the Sudbury smelting area. New Phytologist, 84(4), 631-647.

27. Davari, M., M. Homaee, and H. Khodaverdiloo. 2010. Modeling phytorememediation of Ni and Cd and from contaminated soils using macroscopic transpiration reduction functions. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 14(7): 75-85.

28. Dennis, T. 2000. A report of the uptake of metal from fertilizer. Journal of Environmental Quality, 33:497-504.

29. Dusek, L. 1995. The effect of cadmium on the activity of nitrifying populations in two different grassland soils. Plant and Soil, 177(1): 45-53.

30. Ghaderian, S. M., and N. Jamali Hajiani .2010. The evaluation of tolerance and accumulation of cadmium in Matthiola chenopodiifolia. Iranian Journal of Botanical Biology, 6(8): 87-98.

31. Godbold, D. L., and A. Huttermann. 1985. Effect of zinc, cadmium and mercury on root elongation of Picea abies (Karst.) seedlings, and the significance of these metals to forest die-back. Environ. Pollut. Series A, Ecological and Biological, 38(4): 375-381.

32. Gong, J. M., D. A. Lee, and J. I. Schroeder. 2003. Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatins and cadmium in Arabidopsis. Proceedings of the National Academy of Sciences, 100(17): 10118-10123.
33. Gussarson, M., H. Asp, S. Adalsteinsson, and P. Jensen. 1996. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of Birth (Betula pendula) by buthionine sulphoximine (BSO). Experimental Botany, 47(2): 211-215.
34. Haghiri, F. 1973. Cadmium uptake by plants. Journal of Environmental Quality, 2: 93-96.
35. Hassan Dar, G. and M. M. Mishra. 1994. Influence of cadmium on carbon and nitrogen mineralization in sewage sludge amended soils. Environmental Pollution, 84(3): 285-290.
36. Helmke, P. H., and D. L. Spark. 1996. Potassium. In Sparks, D.L. et al., Method of soil analysis. Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. (pp. 551-574).
37. Hernandez, L. E., A. Garate, and R. Carpena-Ruiz. 1997. Effects of cadmium on the uptake, distribution and assimilation of nitrate in Pisum sativum. Plant Soil, 189 (6): 97-106.
38. Jalali, M., and Z. V. Khanlari. 2008. Cadmium availability in calcareous soils of agricultural lands in Hamadan, western Iran. Soil and Sediment Contamination, 17(3): 256-268.
39. James, O., and U. C. Emmanuel. 2011. Comparative studies on the protein and mineral composition of some selected Nigerian vegetables. African Journal of Food Science, 5(1): 5-22.
40. Jiang, Z. P. and Y. Wang. 2001. Input-to-state stability for discrete-time nonlinear systems. Automatica, 37(6): 857-869.
41. Kabata-Pendias, A., and H. Pendia. 2001.Trace Elements in Soil and Plants. CRC Press, New York, USA.
42. Kashem, M. A. and S. Kawai. 2007. Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach. Soil Science and Plant Nutrition, 53(3):246-251.
43. Khodaverdiloo H., SH. Ghorbani Dashtaki, and S. Rezapour. 2012. Lead and cadmium accumulation potential and toxicity threshold determined for land cress and spinach. International Journal of Plant Production, 5(3): 275–282.
44. Lindsay, W. L. and W. A. Norvel. 1978. Development of a DTPA soil tests for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal, 42(3): 421-428.
45. Loeppert, R. H., and D. L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum, in: Sparks, D. L., Page, A. L., Sumner, M.E., Tabatabai, M. A. and Helmke, P. A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA. (pp. 437-474).
46. Lorenz, N., T. Hintemann, T. Kramarewa, A. Katayama, T. Yasuta, P. Marschner, and E. Kandeler. 2006. Response of microbial activity and microbial community composition in soils to long-term arsenic and cadmium exposure. Soil Biology and Biochemistry, 38(6): 1430-1437.
47. McLaughlin, M. J., D. R. Parker, and J. M. Clarke. 1999. Metals and micronutrients–food safety issues. Field crops research, 60(1-2): 143-163.
48. Muriefah, S. S. 2008. Growth parameters and elemental status of cucumber (*Cucumus sativus*) seedlings in response to cadmium accumulation. International Journal of Agriculture and Biology, 10(3): 261-266.
49. Narval, R., P. M. Singh, and M. Singh. 1993. Effect of cadmium and zinc application on quality of maize. Indian Journal of Plant Physiology, 36: 170-173.
50. Nocito, F. F., L. Pirovano, M. Cocucci, and G. A. Sacchi. 2002. Cadmium-induced sulfate uptake in maize roots. Plant Physiology, 129(4): 1872-1879.

51. Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe, and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. United States Goverment. Print Office, Washington, D. C.
52. Page, A. L. 1982. Methods of soil analysis, Part 2-Chemical and microbiological properties. Soil Science Society of America.
53. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and and total dissolved solids. Method of soil analysis, parss: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA. (pp. 417-436).
54. Sandalio, L. M., H. C. Dalurzo, M. Gomez, M. C. Romero-Puertas, and L. A. delRio. 2001. Cadmium– induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. Journal of experimental botany, 52(364): 2115-2126.
55. Schützendübel, A., P. Schwanz, T. Teichmann, K. Gross, R. Langenfeld-Heyser, D. L. Godbold, and A. Polle. 2001. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots. Plant physiology, 127(3): 887-898.
56. Shaikh, I. R., P. R. Shaikh, R. A. Shaikh, and A. A. Shaikh. 2013. Phytotoxic effects of heavy metals (Cr, Cd, Mn and Zn) on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and seedlings growth in black cotton soil of Nanded, India. Research Journal of Chemical Sciences, 3(6): 14-23.
57. Singh, B. R., and K. Myhr. 1998. Cadmium uptake by barley as affected by Cd sources and pH levels. Geoderma, 84(1-3): 185-194.
58. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. (pp. 475-490). In Sparks, D. L. *et al.*, Method of Soil Analysis. Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy,Inc. Madison, Wisconsin, USA.
59. Vassilev, A., J. Vangronsveld, and I. Yordanov. 2002. Cadmium phytoextraction: Present state, biological backgrounds and research needs. Bulgarian Journal of Plant Physiology, 28(3-4): 68–95.
60. Vassilev, A., M. Berova, N. Stoeva, and Z. Zlatev. 2005. Chronic Cd toxicity of bean plants can be partially reduced by supply of ammonia sulphate. Journal of Central European Agriculture, 6(3): 389-396.
61. Walkley, A., and I. A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37(1): 29-38.
62. Wang, S., W. Wu, F. Liu, R. Liao, and Y. Hu. 2017. Accumulation of heavy metals in soil-crop systems: a review for wheat and corn. Environmental Science and Pollution Research. 24(18): 15209-15225.
63. Wu, F., J. Dong, Y. Cai, F. Chen, and G. Zhang. 2007. Differences in Mn uptake and subcellular distribution in different barley genotypes as a response to Cd toxicity. Science of the Total Environment, 385(1-3): 228-234.
64. Yadegari, M., and A. Karimpoor Dehkordi. 2010. Evaluation of some heavy metals accumulation within the soil and corps around Industrial Town of Shahr-e-Kord. Bioscience, Biotechnology Research Asia,7(1): 1-12.
65. Yang, M. J., L. Xianyong, and Y. Xiaoer. 1998. Impact of Cd on growth and nutrient accumulation of different plant species. Chinese Journal of Applied Ecology, 9(1): 89-94.

Effect of Cadmium on Some Growth Indices and Nutrients Concentrations of Different Wheat Cultivars

A. Tavakoli[1], A. Golchin, and S. Abdollahi

MSc., Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran;
E-mail: atefeh.tavakoli92@gmail.com

Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran;
E-mail: agolchin2011@yahoo.com

PhD., Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran;
E-mail: samaneh.abdollahi87@yahoo.com

Received: May,2020 and Accepted: October, 2020

Abstract

With the growth of industries and technologies, the entry of pollutants, especially heavy metals, into the soil has raised the international community's concern about food security. The aim of this study was to investigate the effect of cadmium on some growth indicators and nutrient concentrations of different wheat cultivars. For this purpose, a factorial pot experiment was conducted in greenhouse conditions using a completely randomized design with three replications. The studied factors included five levels of soil contamination by cadmium (zero, 10, 25, 50, and 100 mg Cd/kg of soil) from the source of cadmium sulfate [3Cd $(SO_4).8H_2O$] and four wheat cultivars (Zare, Pishgam, Mihan, and Orum). The results showed that different levels of soil cadmium significantly reduced wet and dry weights of the aerial part and root, leaf chlorophyll index, plant height, as well as nitrogen, phosphorus, potassium, iron and copper concentrations of different wheat cultivars. The highest levels of these traits were obtained from the control treatment (without cadmium contamination), and the lowest from the treatment with 100 mg Cd/kg of soil. Different wheat cultivars reacted differently to various levels of soil cadmium. Pishgam and Orum cultivars showed the least sensitivity and Mihan cultivar showed the highest sensitivity to soil contamination by cadmium.

Keywords: Soil pollution, Heavy metals, cv.Zare, cv.Pishgam, cv.Orum, cv.Mihan.

[1.] Corresponding author: Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Zanjan University