نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۲، شماره ۴ ، زمستان ۱۳۹۳، ص. ۷۶۵-۷۵۱

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 12, No. 4, Winter. 2015, p. 751-765

مطالعه تأثیر تنش کادمیم بر خصوصیات مورفولوژیکی و میزان تجمع این عنصر در جو

محسن سعدلو پاریزی[۱]- علی اصغری[۲*]- عبدالرضا اخگر[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۵/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۷

چکیده

کادمیم فلزی سمی است که تهدیدی برای سلامتی انسان و سایر موجودات زنده می‌باشد. برای بررسی تأثیر تنش کادمیم بر خصوصیات مورفولوژیکی ۴۰ ژنوتیپ جو، آزمایشی به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۰ در دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. عنصر کادمیم در دو سطح شاهد و ۵۰ میکرومولار مورد استفاده قرار گرفت. بذور در بستر پرلیت و پیت‌ماس کشت و با محلول غذایی هوگلند بدون کادمیم (شاهد) و حاوی کادمیم آبیاری شدند. بعد از مرحله رسیدگی، صفات مورفولوژیکی اندازه‌گیری گردید. تجزیه واریانس تنوع قابل ملاحظه‌ای را بین ژنوتیپ‌ها از نظر تجمع کادمیم نشان داد. در سطح شاهد تجمع کادمیم در ژنوتیپ‌ها وجود نداشت. در سطح تنش کادمیم، در دانه ارقام آبیدر، دشت، صحرا، قره‌آرپا، ینسیوی، دایتون رانی و سهند تجمع کادمیم وجود نداشت و لاین ۱۸ (F-A2-11) همراه با برخی دیگر از لاین‌ها و رقم بهمن بیشترین تجمع کادمیم در دانه را داشتند. همچنین، بیشترین مقدار تجمع کادمیم در شاخ و برگ در لاین ۱۸ مشاهده گردید. سپس، لاین‌های ۲۴، ۲۵، ۲۹ و رقم بهمن تجمع کادمیم بیشتری در شاخ و برگ‌ها داشتند. لاین‌های ۳، ۶، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۲۰ و ارقام ینسیوی و ماکویی کمترین تجمع کادمیم را در شاخ و برگ خود داشتند. در مجموع، در اغلب ژنوتیپ‌ها تنش کادمیم باعث کاهش میانگین صفات اندازه‌گیری شده گردید. در دو سطح شاهد و تنش کادمیم، گروه بندی ژنوتیپ‌ها با استفاده از روش تجزیه خوشه‌ای بر مبنای صفات اندازه‌گیری شده، ژنوتیپ‌ها را در ۵ گروه مجزا قرار داد. رقم قره‌آرپا از نظر اکثر صفات اندازه‌گیری شده بهتر بود و در هر دو سطح شاهد و تنش در گروه‌هایی قرار گرفت که میانگین صفات بالاتری نسبت به بقیه گروه‌ها داشتند.

واژه‌های کلیدی: تنوع ژنتیکی، فلزات سمی، تنش، تحمل ارقام

مقدمه

فلزات سنگین از جمله مهمترین آلاینده‌های زیست محیطی محسوب می‌شوند که کاربردهای زیادی در صنعت دارند. آلودگی محیط زیست با عناصر سنگین، باعث انتقال آن‌ها به محصولات زراعی خواهد شد که امروزه به عنوان یک مشکل جهانی در حال گسترش است. با وجود آلودگی منابع مورد استفاده به فلزات سنگین، ضمن کاهش کمّی و کیفی محصولات کشاورزی، تولید پایدار و سلامت انسان‌ها نیز با خطر مواجه می‌شود (۱). کادمیم در بین فلزات سنگین دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. زیرا، ممکن است بدون ایجاد علایم سمیت در اندام‌های گیاهی تجمع یافته و از این طریق وارد زنجیره‌های غذایی می‌گردد (۲۱).

میزان کادمیمی که از یک گیاه زراعی به رژیم غذایی انسان وارد می‌شود، به میزان تجمع یافته آن در بخش‌های مورد مصرف بستگی دارد. دانه مخزن نهایی تجمع کادمیم در گیاهان زراعی است. میزان تجمع کادمیم در دانه ارقام گیاهی از نظر ژنتیکی متفاوت است. لذا، تجمع کادمیم درون گیاه و به ویژه دانه، برای بررسی جذب کادمیم از طریق رژیم غذایی انسان بسیار مهم است (۱۵). تحقیقات نشان داده است که افزایش فلزات سنگین در خاک باعث افزایش جذب آنها در غلات می‌شود. منبع اصلی و عمده کادمیم در رژیم غذایی انسان دانه غلات می‌باشد (۳۴). تنوع ژنتیکی در تجمع کادمیم در دانه ممکن است با جنبه‌های فیزیولوژیک نظیر قابلیت جذب متفاوت کادمیم در ریشه، تنوع در توانایی انتقال کادمیم و ظرفیت تجمع کادمیم مرتبط باشد (۶). یکی از مهمترین راه‌های کاهش میزان کادمیم در بافت‌های گیاهان زراعی، یافتن گونه‌هایی است که در صورت کشت در

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی
(*- نویسنده مسئول: Email: ali_asgharii@yahoo.com)
۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

خاک‌های آلوده، مقدار کمتری کادمیم را جذب و در اندام‌های خود ذخیره می‌سازند. وجود تنوع ژنتیکی بین گونه‌ها و ارقام گیاهی از لحاظ تجمع کادمیم امکان استفاده از روش‌های اصلاحی جهت انتخاب ژنوتیپ‌هایی با میزان پایین تجمع کادمیم را میسر می‌سازد (۳۷).

گونه‌ها و ارقام و حتی بخش‌های مختلف گیاهی از لحاظ جذب و تجمع عناصر سنگین تفاوت دارند که این تفاوت‌ها تحت تأثیر عوامل ژنتیکی قرار می‌گیرد. با وجود تنوع ژنتیکی برای صفت جذب و ذخیره عناصر نامطلوب مانند کادمیم در یک گونه، امکان استفاده از اصلاح نباتات جهت انتخاب ارقام با تجمع میزان پایین کادمیم وجود دارد (۸). بنابراین، استفاده از روش‌های اصلاحی راه حلی مفید برای مقابله با تنش کادمیم در زمین‌های آلوده خواهد بود. که، می‌توان ارقام متحمل را جهت اصلاح خاک و ارقامی که دارای تجمع میزان کم کادمیم هستند را جهت کاشت در اراضی آلوده انتخاب نمود.

در کشورهای در حال توسعه، مواد غذایی مبتنی بر غلات به عنوان منبع تأمین انرژی و پروتئین، مورد مصرف قرار می‌گیرند. لذا، بیشترین میزان کادمیمی که وارد بدن افراد در این جوامع می‌شود، مربوط به غلات است. بنابراین، کاهش میزان کادمیم در دانه غلات جهت سلامتی انسان اهمیت خواهد داشت (۹). از این رو، افزایش تولید و بهبود کیفیت دانه غلات و از جمله جو نقش مهمی در سلامتی انسان ایفا می‌کند. جو یکی از غلات مهم می‌باشد که در نقاط مختلف دنیا به منظور تولید دانه در مصارف غذایی انسان، تغذیه حیوانات و صنعت کشت می‌گردد. تحقیقات انجام شده نشان داد که تنش ایجاد شده به وسیله کادمیم باعث تجمع آن در ریشه، ساقه، برگ و دانه‌های جو (*Hordeum vulgare*) از جمله کولتیوارهای زمستانه (obzor) و (hemus) و جو بهاره رقم (kompakt) گردید. میزان تجمع در ریشه و ساقه‌ها نسبت به برگ و دانه‌ها بیشتر بود (۵، ۳۰ و ۳۳). این مطالعه با هدف بررسی تجمع کادمیم در اندام‌های گیاه جو و تاثیر آن روی خصوصیات مورفولوژیکی این گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. کادمیم به عنوان عامل اصلی در دو سطح صفر (شاهد) و ۵۰ میکرومولار (۹/۱۶۵ ppm) استفاده شد و ۴۰ ژنوتیپ جو به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. کاشت به روش هیدروپونیک در بستری مخلوط از پرلیت و پیت ماس به نسبت حجمی ۳ به ۱ در گلدان‌هایی با ارتفاع ۳۰، طول ۳۷ و عرض ۲۵ سانتی‌متر و حجم ۰/۰۳ مترمکعب انجام شد. در هر گلدان تعداد ۴ ردیف با فاصله ۱۰ سانتی‌متر به صورت عرضی برای کاشت در نظر گرفته شد و در هر ردیف تعداد ۱۰ بذر با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر کشت گردید. از محلول غذایی هوگلند با pH حدود ۵/۵ برای آبیاری استفاده گردید.

جدول ۱- اسامی ژنوتیپ‌های جو مورد استفاده در آزمایش

شماره و	نام ژنوتیپ (لاین)	شماره و	نام ژنوتیپ (لاین)	شماره و	نام ژنوتیپ (رقم)
۱	Dari-friz88-A1	۱۶	F-A1-1	۳۰	جو لخت-۹
۲	Dari-friz88-A2	۱۷	F-A1-2	۳۱	جو لخت-۱۸
۳	Dari-friz88-A3	۱۸	F-A2-11	۳۲	بهمن
۴	Dari-friz88-A4	۱۹	F-A3-2	۳۳	ینسیوی
۵	Dari-friz88-A5	۲۰	F-A3-3	۳۴	صحرا
۶	Dari-friz88-A6	۲۱	F-A3-12	۳۵	قره آرپا
۷	Dari-friz88-A7	۲۲	F-PRBYT-29	۳۶	دشت
۸	Dari-friz88-A8	۲۳	F-ERB-84-11	۳۷	دایتون رانی
۹	Dari-friz88-A9	۲۴	F-ERB-84-5	۳۸	آبیدر
۱۰	Dari-friz88-A10	۲۵	F-ERB-84-6	۳۹	سهند
۱۱	Dari-friz88-A11	۲۶	F-ERB-85-5	۴۰	ماکویی
۱۲	Dari-friz88-A12	۲۷	F-ERB-85-7		
۱۳	Dari-friz88-A13	۲۸	F-ERB-85-10		
۱۴	Dari-friz88-A14	۲۹	F-ERB-86- 7		
۱۵	Dari-friz88-A15				

ترکیب عناصر غذایی مورد استفاده در طول دوره رشد شامل عناصر پرمصرف $Ca(NO_3)_2$، KNO_3، $MgSO_4$، KH_2PO_4 به ترتیب در مقادیر ۰/۱۷، ۱/۵، ۲/۵ و ۳ میلی‌مول و کم مصرف ($FeSO_4$، H_3BO_3، $MnSO_4$، $ZnSO_4$، $CuSO_4$، H_2MoO_4 به ترتیب در مقادیر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۵، ۲۳ و ۵۰ میکرومول بود (۷). از مرحله‌ی ۳ تا ۴ برگی گیاهچه‌ها، مقدار ۵۰ میکرومول کلرید کادمیم به محلول غذایی اضافه شد و برای تیمار کادمیم مورد استفاده قرار گرفت. اعمال تیمار مذکور به مدت ۵۰ روز ادامه یافت. برای آبیاری گیاهان شاهد از محلول غذایی هوگلند فاقد کادمیم استفاده گردید.

بعد از مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی از بوته‌های هر تکرار مربوط به گیاهان شاهد و تنش کادمیم، پنج بوته به طور تصادفی برداشت گردید. طول ساقه و پدانکل با خط‌کش بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و تعداد سنبله‌ها شمارش گردید. سپس بوته‌ها به طور جداگانه داخل پاکت کاغذی قرار گرفت و به آزمایشگاه منتقل شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک گردید. بعد از این مرحله وزن خشک ساقه و سنبله با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. سپس دانه‌ها از سنبله جدا و شمارش گردید. برای صفت عملکرد تک‌بوته نیز دانه‌های مربوط به هر بوته توزین گردید. بیوماس اندام هوایی از مجموع وزن خشک سنبله، ساقه و برگ‌ها به‌دست آمد. برای محاسبه وزن هزار دانه، از مجموع دانه‌های مربوط به هر تکرار، تعداد ۱۰۰ دانه انتخاب و توزین شد، عدد حاصل در ۱۰ ضرب و به عنوان وزن هزار دانه منظور گردید. میانگین داده‌های حاصل از پنج بوته برای صفات مذکور در هر تکرار در نظر گرفته شد. همچنین، شاخص سبزینگی گیاهان به عنوان یک صفت فیزیولوژیک، با گذشت یک ماه از اعمال تنش کادمیم اندازه‌گیری گردید. برای این منظور برگ سوم هر بوته انتخاب و با دستگاه SPAD-502 میزان کلروفیل آن به عنوان شاخصی از سبزینگی گیاه قرائت شد.

میزان کادمیم تجمع یافته در بذر و ساقه همراه با برگ‌ها در ژنوتیپ‌های مورد نظر اندازه‌گیری شد. به این منظور ابتدا عصاره‌گیری انجام گرفت. جهت عصاره‌گیری، مقدار یک گرم از این اندام‌ها آسیاب و در کوره الکتریکی در دمای ۴۵۰ درجه به مدت ۲ ساعت خاکستر شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به آن افزوده گردید و تا زمان شروع جوشش روی هیتر قرار داده شد و سپس محلول حاصل با کاغذ صافی واتمن ۴۲، صاف گردید و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد (۳۶). جهت اندازه‌گیری غلظت کادمیم، عصاره حاصل به دستگاه جذب اتمی مدل GBC AWANTA تزریق شد و اعداد قرائت شده درعدد ۱۰۰ که درجه رقت عصاره بود، ضرب گردید و به صورت میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم ماده خشک گیاه یادداشت شد. لازم به ذکر است که از بین این ژنوتیپ‌ها، رقم ماکویی به سنبله نرفت و لذا برای این رقم فقط میزان کادمیم ساقه - برگ اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس داده‌ها به صورت کرت‌های خرد شده انجام شد. در صفاتی که اثر متقابل تکرار با تنش (خطای اول) معنی‌دار نبود، این خطا با خطای فرعی ادغام و تجزیه واریانس داده‌ها به صورت فاکتوریل انجام شد. از آنجا که برای صفات میزان کادمیم دانه و ساقه–برگ، مقدار کادمیم در سطح شاهد صفر بود، لذا این دو صفت به صورت طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن و LSD در سطح احتمال یک درصد صورت گرفت. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS v.16 انجام شد.

نتایج و بحث

بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر میزان کادمیم تجمع یافته در دانه و ساقه با برگ‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (جداول ۲ و ۳). مقایسات میانگین ژنوتیپ‌ها نشان داد که از لحاظ صفت میزان کادمیم موجود در دانه، لاین شماره ۱۸ (F-A2-11) دارای بیشترین میزان تجمع کادمیم در دانه بود. رقم بهمن نیز از این لحاظ در رتبه بعد قرار داشت. ضمن این که در دانه تعدادی از ژنوتیپ‌ها میزان کادمیم صفر بود (شکل ۱). از نظر صفت میزان کادمیم ساقه–برگ نیز لاین شماره ۱۸ بیشترین میزان تجمع کادمیم را داشت. بنابراین، لاین شماره ۱۸ دارای بیشترین میزان جذب و تجمع کادمیم در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه بود. لاین شماره ۲۵ نیز مقدار قابل توجهی کادمیم در ساقه و برگ‌هایش بود. لاین‌های شماره ۲۴ و ۲۹ به همراه رقم بهمن در مرتبه بعدی قرار داشتند. لذا، رقم بهمن نیز بعد از لاین شماره ۱۸ دارای تجمع نسبتاً بالای کادمیم در دانه و ساقه با برگ‌ها بود. لاین‌های ۳، ۶، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۲۰ و ارقام ماکویی و ینسیوی کمترین میزان تجمع کادمیم در ساقه و برگ‌ها را داشتند (شکل ۲). نتایج تحقیقات مان و همکاران (۲۰) نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین تجمع کادمیم در دانه و تجمع آن در اندام هوایی در شرایط مزرعه وجود دارد. هرچند که شرایط مزرعه با گلخانه متفاوت می‌باشد. در حالت مقایسه تجمع کادمیم بین دانه و ساقه–برگ، میزان تجمع در ساقه و برگ‌ها بیشتر از دانه‌ها بود. واسیلف و همکاران (۳۰) گزارش کردند که بیشترین میزان تجمع کادمیم در گیاه جو در ریشه و برگ‌های پایینی و سپس ساقه و برگ‌های بالایی و کمترین میزان تجمع آن در دانه‌ها بود.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل ژنوتیپ با کادمیم در کلیه صفات مورد بررسی معنی‌دار بود (جداول ۱ و ۴). مقایسات

میانگین اثرات متقابل کادمیم در ژنوتیپ نشان داد که در بین ارقام و لاین‌های مورد مطالعه از نظر تحمل این تنش محیطی تنوع ژنتیکی بالایی وجود داشت و عکس‌العمل ژنوتیپ‌ها در این شرایط یکسان نبود. به هرحال، نتایج مقایسات میانگین صفات نشان دهنده کاهش مقادیر صفات مورفوفیزیولوژیک در اکثر ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش کادمیم بود. که، بیانگر تاثیر منفی کادمیم بر رشد گیاهان است (جدول ۵). شانکر و همکارن (۲۶) اظهار داشتند که کادمیم با اختلال در سوخت و ساز سلولی بخش هوایی باعث کاهش ارتفاع گیاهانی مانند برنج (*Oriza sativa*)، گوجه فرنگی (*Lycopersicum esculentum*)، سورگوم (*Sorghum bicolor*)، یونجه (*Medicago sativa*)، اسفناج (*Spinacia oleracea*)، سویا (*Soja hispida*) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) گردید. تاثیر نامطلوب کادمیم بر ارتفاع، وزن خشک و تر و دیگر شاخص‌های رشدی برنج گزارش شده است (۱۳). کیان و همکاران (۲۳) علت کاهش طول اندام هوایی را اثر نامطلوب کادمیم در کاهش تقسیم سلولی و کاهش رشد سلول‌های مریستمی ذکر کردند. نتایج تحقیقات حاکی از کاهش طول اندام هوایی گندم در اثر تنش ناشی از کادمیم به صورت ترکیب کلرید کادمیم با غلظت ۰/۲۵ میلی‌مولار بود (۴). بیوماس و صفات طولی گیاه به عنوان شاخص‌های سمیت فلزات سنگین در گیاهان شناخته می‌شوند (۱۷). کادمیم باعث کاهش سنتز کلروفیل از طریق جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های مؤثر در بیوسنتز کلروفیل می‌گردد (۲۷). کادمیم با اختلال در فعالیت آنزیم‌های مؤثر در چرخه تثبیت دی‌اکسید کربن، اثر مخرب بر واکنش‌های وابسته به نور و مستقل از نور و ممانعت از فعالیت آنزیم روبیسکو، تثبیت CO_2 و فتوسنتز را در گیاه کاهش می‌دهد (۳۵). در مطالعه‌ای روی گیاهچه‌های جو، تحت تیمار کلریدکادمیم با غلظت ۵۴ میکرومولار به علت محدود شدن روزنه‌ها و کاهش جذب دی‌اکسید کربن و سرعت فتوسنتز، میزان رشد نسبی کاهش یافت (۲۹). تحقیقات واسیلف و همکاران (۳۰) نشان داد که تیمار گیاهچه‌های جو به وسیله کادمیم به علت کاهش سرعت فتوسنتز، در اثر کاهش کلروفیل و کاروتنوئیدها، باعث محدود شدن رشد آنها شد. در تحقیق دیگری نیز مشخص گردید که بیشترین مسمومیت ناشی از کادمیم در اندام هوایی، مربوط به رنگدانه‌ها و در نتیجه اختلال در تبادلات گازی بود. تنش ناشی از کادمیم باعث کاهش فلورسانس کلروفیل در گیاهچه‌های جو گردید. لذا، کادمیم مانع رشد و نمو گیاهچه‌ها و جلوگیری از ذخیره ماده خشک شد (۳۱). همچنین، کادمیم در غلظت ۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک خاک و به شکل سولفات کادمیم، با اختلال در فتوسنتز و تنفس، باعث مهار میزان ماده‌سازی و در نتیجه کاهش رشد و تولید ماده خشک در بوته‌های جو گردید (۳۲ و ۳۳). کادمیم باعث افزایش محتوی پلی‌فنول‌ها در جو نیز شد. اسیدسالیسیلیک که یکی از پلی-فنول‌ها می‌باشد، باعث کاهش سمیت کادمیم و افزایش تحمل جو در برابر تنش ناشی از کادمیم گردید (۵). یکی از دلایل سمیت کادمیم برای گیاهان، برهمکنش آن با عناصر غذایی ضروری گیاه است. که، باعث برهم خوردن تعادل عناصر غذایی و کاهش باروری گیاه می-گردد (۲۵). تنش کادمیم باعث افزایش غلظت آن در اندام‌های مختلف بوته‌های جو و کاهش غلظت عنصر روی شد. لذا، کاهش عنصر روی باعث اختلال در فرآیندهای متابولیسمی و کاهش رشد بوته‌های جو گردید (۳۸).

کادمیم باعث اختلال در متابولیسم لیپیدها می‌شود. یکی از اثرات سمیت کادمیم تشکیل مالون دآلدئید است که شاخص کلی پراکسیداسیون لیپید می‌باشد (۲۴). نتایج تحقیقات ویو و همکاران (۳۹) مشخص نمود که در گیاهان جو تحت تنش کادمیم تجمع مالون دآلدئید اتفاق افتاد. لذا، تنش کادمیم باعث اختلال در متابولیسم لیپیدها در گیاه جو گردید. کادمیم با تولید رادیکال‌های آزاد سمی باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و اختلال در فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدان سوپراکسید دسموتاز و پراکسیداز و تغییر در ویژگی‌های فیزیولوژی و ساختاری برگ جو شد (۱۹). فعالیت آنزیم پراکسیداز در سلول‌های ریشه جو در اثر تنش کادمیم تغییر نمود. این آنزیم با عملکرد آنتی‌اکسیدانی در هنگام تنش کادمیم برای گیاه نقش حفاظتی دارد. کاهش ۵۰ و ۷۰ درصدی در رشد طولی ریشه‌های جو در غلظت ۱ و ۲ میلی‌مولار کادمیم اتفاق افتاد (۲۸).

از طرفی بعضی از ژنوتیپ‌ها، مخصوصاً لاین‌های ۹، ۱۰، ۱۷، ۱۸، ارقام دایتون رانی، سهند و جو لخت ۹ و ۱۸ دارای میانگین بالاتری برای بعضی صفات در سطح تنش کادمیم نسبت به سطح شاهد بودند (جدول ۵). که، بیانگر مقاوم بودن این ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش کادمیم است. این نتیجه حتی حاکی از آن است که کادمیم باعث تحریک رشد و نمو آنها شده است. تحریک رشدی گیاهان به عنوان پاسخی به غلظت‌های پایین عناصر سنگین توسط کیناردی (۱۸) گزارش شده است. در این آزمایش تأثیر غلظت‌های (۶/۴۸، ۴/۸۶، ۳/۲۴ و ۱/۶۲ میکرومول) کلرید آلومینیم و غلظت‌های (۱۰، ۵ و ۲ میکرومول) کلرید لانتانیم بر رشد دو کولتیوار گندم (Atlas 66) و (Scout 66) و رقم (Tyler) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن بیانگر افزایش برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی مانند بیوماس بود، که در اثر تسریع مکانیزم‌های بیوسنتز آنزیم‌های مؤثر در رشد و نمو گیاهان اتفاق افتاده است. بنا به نظر کندی و گونزالف (۱۶) فلزات سنگین در غلظت پایین غشاء سلولی را هیپرپولاریزه و منبع انرژی برای جذب

کاتیون‌ها فراهم کرده و در نتیجه تورم سلولی افزایش می‌دهد. آزمایش مذکور با غلظت ۱۰۰ میکرومول عناصر کادمیم، روی، سرب و مس در گیاه ذرت انجام و افزایش برخی شاخص‌های رشدی مشاهده گردیده است. کادمیم با تحریک ژن‌های مربوط به تکثیر سلول‌ها، می‌تواند باعث افزایش رشد گردد (۳). همچنین، کادمیم می‌تواند فعالیت برخی آنزیم‌ها، نظیر پروتئازها را افزایش دهد و افزایش رشد را باعث گردد (۱۰). نتایج تحقیق آردوینی و همکاران (۲) نیز نشان دادند که کادمیم در غلظت‌های ۳۷/۵، ۲۵ و ۱۲/۵ میکرومولار باعث افزایش بیوماس، سرعت رشد نسبی و ضخامت ریشه گیاه *Miscanthus sinensis* L. شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که کادمیم باعث تحریک و بیان ژن‌های مربوط به پاسخ در برابر تنش اکسیداتیو در برگ‌های جو گردید. بین ارقام جو از لحاظ تحمل تنش کادمیم تنوع وجود داشته است. که، علت آن وجود تفاوت‌های ژنتیکی بود (۳۹). مقاومت در برابر تنش کادمیم دلایل مختلفی دارد. از جمله، تولید فیتوکلاتین‌ها که با اتصال به فلزات سنگین در گیاه تحت تنش کادمیم، از فعالیت یون‌های آزاد فلزی می‌کاهند. تولید فیتوکلاتین‌ها در حضور کادمیم تحریک شده و کمپلکس کادمیم-فیتوکلاتین در واکوئل سلول‌های ریشه ذخیره شده و از این طریق جابجایی کادمیم کاهش می‌یابد (۱۲). توانایی ژنوتیپ‌های گیاهی برای سمیت‌زدایی کادمیم بوسیله فیتوکلاتین‌ها، بین و درون گونه‌ها متفاوت است که این موضوع نقش حیاتی در تظاهرتحمل به سمیت کادمیم ایفا می‌کند (۱۴). مقاومت به کادمیم به وجود پپتیدهای SHدار (فیتوکلاتین‌ها) مربوط می‌شود که با کادمیم تشکیل کمپلکس می‌دهند (۱۱).

از عوامل تاثیرگذار بر جذب کادمیم و سمیت آن در گیاه، وضعیت تغذیه‌ای گیاه به ویژه در رابطه با عناصر کم مصرف می‌باشد. علی‌رغم وجود کادمیم در محلول غذایی در سیستم کشت هیدروپونیک، گیاهان ذرت فقط علایم سمیت را در غلظت‌های بالای کادمیم بروز دادند. همچنین، نفوذ کادمیم به ریشه در زمانی که مقدار عناصر کم مصرف در محلول غذایی پایین بوده، سه برابر بیشتر از زمانی شده که مقدار این عناصر در محلول کافی بوده است (۲۲). با توجه به این‌که در پژوهش حاضر، از محلول غذایی هوگلند استفاده شد که دارای مقدار کافی از عناصر غذایی می‌باشد. لذا، تأثیر منفی تنش کادمیم بر ژنوتیپ‌های جو تا حدودی کاهش یافت.

جدول ۱- تجزیه واریانس طرح کرت‌های خرد شده برای صفات وزن خشک ساقه و بیوماس در ژنوتیپ‌های جو

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		وزن خشک ساقه	بیوماس
کادمیم	۱	۱/۸۵**	۱۱/۰۴**
خطای اول	۴	۰/۰۸	۰/۲۱
ژنوتیپ	۳۸	۰/۷۲**	۴/۲۳**
ژنوتیپ در کادمیم	۳۸	۰/۰۷**	۰/۳۷**
خطای دوم	۱۵۲	۰/۰۳	۰/۰۸
ضریب تغییرات (٪)		۱۴/۲۸	۹/۹۱

**- معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

جداول ۲ و ۳- تجزیه واریانس میزان کادمیم موجود در ژنوتیپ‌های جو

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات کادمیم دانه
ژنوتیپ	۳۸	۰/۲۴**
خطا	۳۹	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات (درصد)		۶/۰۸

**- معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات کادمیم ساقه- برگ
ژنوتیپ	۳۹	۷۴/۱۶**
خطا	۴۰	۰/۳۲
ضریب تغییرات (درصد)		۱۱/۷۷

**- معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ٤- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک در ژنوتیپ‌های جو مورد مطالعه به صورت فاکتوریل

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		طول ساقه	طول پدانکل	تعداد سنبله	تعداد دانه	وزن خشک سنبله	عملکرد تک بوته	وزن هزاردانه	شاخص سبزینگی
کادمیم	۱	۳۷۳/۴۲**	۲۷/۰۸^{ns}	۳/۵۵**	۱۰۷۹/۵۲**	۳/۸۵**	۲**	۲۴۶/۵۶**	۹۳۰۷/۶۳**
ژنوتیپ	۳۸	۴۸۱/۷۴**	۱۵۵/۱**	۱/۹۷**	۳۰۹/۶۷**	۱/۵۶**	۱/۲۵**	۴۱۶/۱۷**	۳۹۴/۴۲**
کادمیم× ژنوتیپ	۳۸	۶۵/۹۳**	۲۹/۸۴**	۰/۲۱**	۴۹/۰۱**	۰/۱۴**	۰/۱۱**	۶/۵۷*	۱۲۶/۹۴**
خطا	۱۵۶	۲۶/۹۵**	۸/۲۵**	۰/۰۴۵**	۱۰/۳**	۰/۰۲۶**	۰/۰۵۳**	۴/۰۹**	۱۹/۸**
ضریب تغییرات (درصد)		۷/۰۷	۱۲/۳۱	۱۲	۹/۸۹	۱۰/۰۱	۱۷/۳۶	۴/۰۶	۸/۴۸

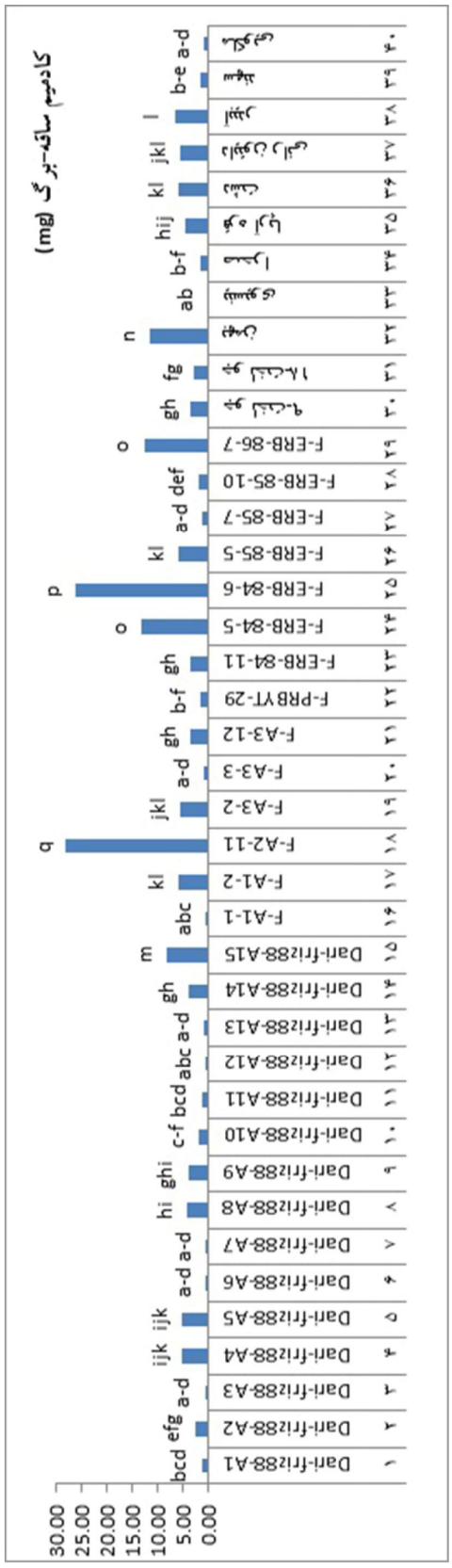
ns ، * و **- به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل ژنوتیپ در تنش کادمیم برای صفات مورفولوژیک در ژنوتیپ‌های جو

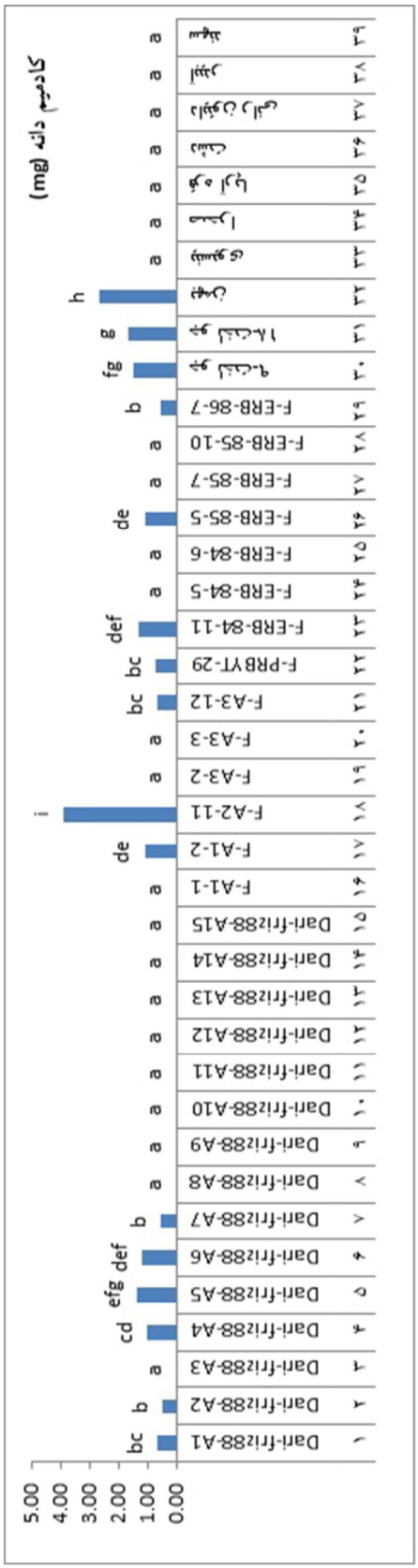
ژنوتیپ	طول ساقه		طول پدانکل		تعداد خوشه		تعداد دانه		وزن خشک خوشه	
	شاهد	تنش	شاهد	تنش	شاهد	تنش	شاهد	تنش	شاهد	تنش
Dari-friz88-A1	۷۷/۴۷	۷۶/۶۷	۲۹/۲۰	۲۴/۵۳	۲/۴۷	۱/۶۰	۳۳/۸۰	۲۵/۶۷	۱/۸۵	۱/۵۱
Dari-friz88-A2	۸۲/۰۷	۷۴/۱۳	۳۱/۳۳	۲۳/۱۳	۲/۶۷	۲/۱۳	۳۷/۰۷	۳۳/۲۰	۲/۱۰	۱/۸۵
Dari-friz88-A3	۸۰/۷۳	۷۹/۸۰	۳۲/۴۷	۲۶/۷۳	۲/۷۳	۲/۰۷	۳۵/۳۳	۳۱/۳۳	۲/۱۲	۲/۰۰
Dari-friz88-A4	۶۶/۴۷	۶۲/۸۷	۲۴/۸۰	۱۸/۷۳	۲/۳۳	۱/۳۳	۳۰/۸۰	۲۵/۵۳	۱/۹۷	۱/۲۸
Dari-friz88-A5	۷۵/۳۳	۶۵/۲۰	۱۳/۲۰	۱۲/۶۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۸/۳۳	۱۵/۶۰	۱/۰۶	۰/۷۴
Dari-friz88-A6	۸۱/۱۳	۷۱/۵۳	۲۵/۶۰	۲۳/۰۰	۱/۶۷	۱/۴۷	۳۹/۳۳	۳۰/۲۰	۱/۶۸	۱/۶۲
Dari-friz88-A7	۸۱/۰۰	۷۳/۹۳	۳۰/۲۰	۲۴/۰۷	۲/۱۳	۲/۰۰	۳۵/۳۳	۲۹/۶۰	۱/۹۶	۱/۶۵
Dari-friz88-A8	۸۷/۸۰	۷۵/۴۷	۳۱/۵۳	۲۲/۴۰	۲/۳۳	۱/۵۳	۳۲/۷۳	۲۵/۵۳	۱/۷۶	۱/۵۰
Dari-friz88-A9	۷۵/۷۳	۸۲/۰۷	۲۸/۰۰	۲۹/۸۰	۲/۰۰	۲/۲۰	۲۸/۳۳	۲۹/۸۷	۱/۵۹	۱/۵۴
Dari-friz88-A10	۸۴/۲۷	۸۱/۷۳	۳۱/۴۷	۲۹/۴۰	۲/۲۰	۲/۲۰	۲۹/۹۳	۲۹/۳۷	۱/۵۸	۱/۶۰
Dari-friz88-A11	۸۳/۸۷	۷۷/۸۰	۳۲/۶۷	۲۷/۶۷	۲/۶۷	۲/۵۳	۴۱/۰۰	۳۷/۸۷	۲/۱۳	۲/۰۱
Dari-friz88-A12	۸۷/۶۷	۷۶/۰۷	۳۰/۴۷	۲۷/۰۰	۲/۲۷	۲/۴۷	۳۳/۵۰	۳۲/۵۳	۲/۱۱	۱/۸۲
Dari-friz88-A13	۸۰/۶۰	۷۶/۲۰	۳۲/۱۳	۲۶/۴۰	۲/۴۰	۲/۲۰	۳۲/۳۳	۳۳/۵۳	۱/۷۳	۱/۸۰
Dari-friz88-A14	۸۱/۰۰	۸۵/۵۳	۳۱/۰۷	۳۰/۴۰	۲/۴۰	۲/۴۰	۳۴/۱۳	۳۳/۸۰	۱/۹۹	۱/۹۰
Dari-friz88-A15	۸۱/۱۳	۷۶/۲۷	۲۴/۶۰	۲۰/۷۳	۲/۴۷	۲/۴۷	۴۱/۹۳	۴۴/۴۷	۲/۴۳	۲/۴۲
F-A1-1	۶۴/۱۰	۵۳/۰۰	۱۸/۴۰	۱۵/۸۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۲۳/۷۰	۲۲/۲۰	۰/۸۲	۰/۷۵
F-A1-2	۵۵/۶۷	۵۷/۵۰	۱۲/۵۰	۱۵/۵۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۲۹/۱۷	۲۸/۱۷	۱/۰۲	۰/۶۶
F-A2-11	۶۶/۸۷	۶۸/۴۷	۲۰/۶۰	۱۹/۶۰	۱/۱۳	۱/۰۰	۴۵/۸۷	۴۳/۹۳	۱/۵۸	۱/۴۳
F-A3-2	۷۹/۸۰	۶۸/۵۳	۳۰/۱۳	۲۴/۸۷	۲/۷۳	۱/۵۳	۳۸/۹۳	۲۷/۲۰	۲/۱۷	۱/۴۹
F-A3-3	۵۸/۷۷	۵۳/۰۰	۱۶/۹۷	۱۹/۵۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۲۶/۶۳	۲۵/۰۳	۰/۸۶	۰/۸۶
F-A3-12	۶۸/۰۷	۷۴/۸۷	۱۹/۸۰	۲۰/۴۰	۱/۰۷	۱/۱۳	۲۲/۳۳	۱۹/۴۷	۰/۹۵	۰/۷۴
F-PRBYT-29	۷۵/۴۷	۸۱/۲۰	۱۹/۴۰	۲۴/۴۰	۲/۰۷	۱/۵۳	۳۶/۲۰	۲۶/۴۷	۱/۶۰	۱/۳۸
F-ERB-84-11	۸۱/۸۷	۷۸/۲۷	۲۲/۵۳	۲۹/۴۷	۱/۸۷	۱/۴۷	۳۵/۰۰	۲۵/۶۷	۲/۰۷	۱/۳۴
F-ERB-84-5	۶۸/۹۳	۷۹/۶۷	۲۰/۵۳	۳۰/۸۰	۱/۴۷	۱/۳۳	۳۳/۱۳	۲۳/۳۳	۱/۶۲	۱/۱۵
F-ERB-84-6	۷۷/۰۷	۸۰/۸۰	۲۴/۶۰	۲۹/۲۷	۲/۳۳	۱/۴۷	۳۶/۴۷	۲۴/۰۰	۲/۱۰	۱/۳۷
F-ERB-85-5	۸۳/۴۰	۸۱/۶۷	۲۸/۷۳	۲۶/۲۷	۲/۴۰	۱/۵۳	۳۸/۷۳	۲۲/۶۷	۲/۲۳	۱/۳۲
F-ERB-85-7	۸۲/۲۷	۸۰/۲۷	۲۵/۸۷	۲۹/۲۷	۱/۸۷	۱/۶۰	۳۲/۰۰	۲۵/۸۷	۱/۷۷	۱/۶۳
F-ERB-85-10	۷۴/۴۰	۷۰/۰۰	۲۵/۲۷	۲۴/۰۷	۱/۸۰	۱/۲۷	۲۹/۰۰	۱۸/۳۳	۱/۶۲	۱/۰۳
F-ERB-86-7	۶۶/۸۳	۴۸/۰۰	۱۹/۳۳	۱۴/۱۷	۱/۰۰	۱/۰۰	۲۶/۱۷	۲۲/۰۰	۰/۸۴	۰/۵۷
جو لخت-۹	۷۴/۶۷	۷۷/۲۰	۱۹/۲۷	۲۳/۲۷	۱/۳۳	۱/۲۷	۴۱/۹۳	۴۲/۹۳	۱/۶۱	۱/۸۱
جو لخت-۱۸	۷۱/۴۷	۷۰/۵۳	۱۵/۹۳	۱۷/۳۳	۱/۰۰	۱/۱۳	۳۳/۳۳	۳۵/۶۷	۱/۱۸	۱/۵۷
بهمن	۵۰/۶۷	۴۶/۶۰	۱۵/۲۷	۱۳/۹۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۳۷/۳۳	۳۲/۶۷	۱/۱۳	۰/۷۹
ینسیوی	۸۰/۴۰	۷۴/۶۷	۲۵/۹۳	۲۶/۱۳	۱/۹۳	۱/۴۷	۳۱/۸۰	۲۵/۲۷	۱/۹۷	۱/۴۷
صحرا	۶۲/۲۰	۵۶/۸۷	۱۷/۷۳	۱۶/۴۷	۱/۱۳	۱/۰۰	۳۲/۹۳	۲۹/۴۰	۱/۳۰	۱/۱۵
قره آرپا	۷۸/۶۷	۷۸/۶۰	۲۰/۶۰	۲۵/۴۷	۳/۳۳	۲/۸۷	۶۸/۶۰	۴۶/۶۷	۳/۸۸	۲/۷۹
دشت	۶۲/۲۰	۶۲/۸۷	۱۴/۸۷	۱۹/۶۰	۱/۰۷	۱/۱۳	۳۸/۰۰	۴۰/۳۳	۱/۴۰	۱/۲۲
دایتون رانی	۶۸/۹۳	۷۹/۳۳	۲۱/۶۷	۲۳/۸۷	۲/۲۷	۲/۳۳	۳۳/۴۰	۳۸/۶۰	۱/۹۸	۱/۹۳
آبیدر	۷۹/۸۰	۷۵/۴۰	۲۹/۲۰	۲۶/۸۷	۲/۰۷	۱/۹۳	۳۲/۱۳	۳۰/۳۳	۱/۸۰	۱/۷۸
سهند	۷۶/۰۰	۸۳/۶۷	۲۲/۹۳	۲۷/۳۳	۲/۱۳	۲/۵۳	۳۶/۱۳	۴۱/۰۰	۲/۲۷	۲/۳۶
LSD	۱۱/۰۶		۶/۱۱		۰/۴۵		۶/۸		۰/۳	

ادامه جدول ۵

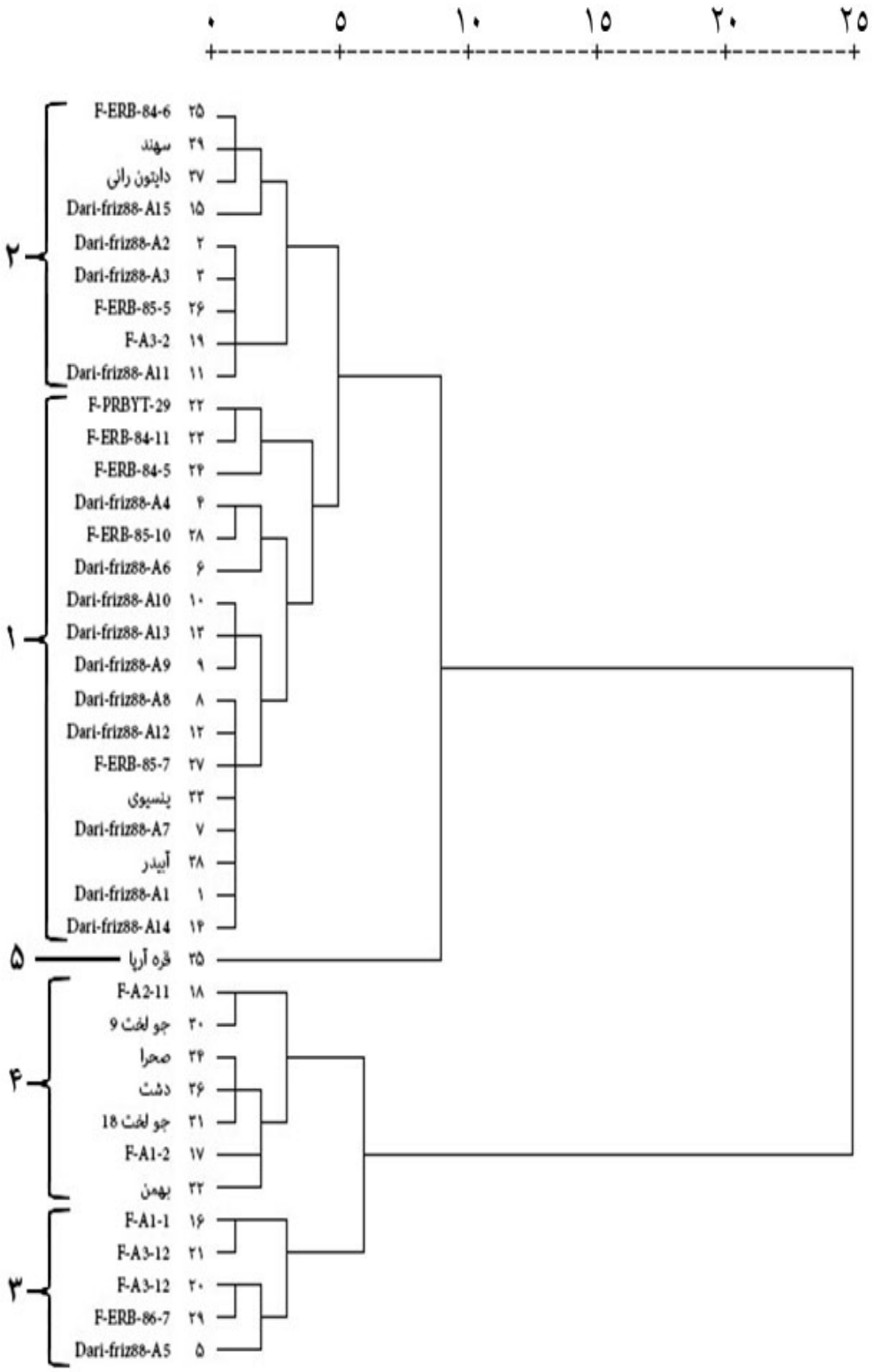
ژنوتیپ	وزن خشک ساقه		بیوماس		وزن هزاردانه		عملکرد تک بوته		شاخص سبزینگی	
	شاهد	تنش	شاهد	تنش	شاهد	تنش	شاهد	تنش	شاهد	تنش
Dari-friz88-A1	۱/۵۰	۱/۳۲	۳/۳۵	۲/۸۳	۵۶/۷۰	۵۳/۸۳	۱/۶۲	۱/۳۴	۵۸/۵۰	۵۲/۶۷
Dari-friz88-A2	۱/۷۶	۱/۵۵	۳/۸۶	۳/۴۰	۵۷/۳۰	۵۴/۴۰	۱/۷۵	۱/۶۱	۵۹/۶۷	۵۴/۰۰
Dari-friz88-A3	۱/۶۰	۱/۶۰	۳/۷۲	۳/۶۰	۵۵/۶۷	۵۳/۴۷	۱/۷۸	۱/۵۸	۶۳/۰۰	۴۶/۳۳
Dari-friz88-A4	۱/۴۵	۱/۰۹	۳/۴۲	۲/۳۷	۴۸/۰۰	۴۳/۸۰	۱/۵۹	۱/۰۴	۵۱/۶۷	۴۱/۶۷
Dari-friz88-A5	۱/۱۵	۱/۲۵	۲/۲۱	۱/۹۸	۵۳/۹۷	۵۰/۵۰	۰/۸۳	۰/۶۶	۳۹/۶۷	۳۲/۶۷
Dari-friz88-A6	۱/۶۰	۱/۳۱	۳/۲۸	۲/۹۳	۴۸/۱۳	۴۷/۴۰	۱/۵۳	۱/۴۲	۴۹/۳۳	۴۶/۰۰
Dari-friz88-A7	۱/۳۵	۱/۲۹	۳/۳۱	۲/۹۴	۵۶/۱۰	۵۴/۷۳	۱/۵۵	۱/۳۶	۵۶/۳۳	۳۸/۶۷
Dari-friz88-A8	۱/۳۹	۱/۲۵	۳/۱۵	۲/۷۵	۵۵/۶۷	۵۴/۱۷	۱/۴۸	۱/۲۴	۶۶/۰۰	۴۴/۰۰
Dari-friz88-A9	۱/۰۸	۱/۱۸	۲/۶۷	۲/۷۲	۵۳/۶۰	۵۳/۱۷	۱/۲۵	۱/۳۱	۶۴/۰۰	۴۶/۰۰
Dari-friz88-A10	۱/۱۷	۱/۲۷	۲/۷۵	۲/۸۸	۵۰/۱۰	۴۳/۴۷	۱/۳۰	۱/۴۷	۶۳/۶۷	۴۴/۳۳
Dari-friz88-A11	۱/۳۶	۱/۳۴	۳/۴۹	۳/۳۶	۵۱/۱۷	۴۹/۵۰	۱/۷۵	۱/۷۵	۵۹/۳۳	۴۳/۰۰
Dari-friz88-A12	۱/۴۹	۱/۵۸	۳/۶۱	۳/۴۰	۵۴/۸۳	۵۳/۴۷	۱/۵۹	۱/۵۶	۶۳/۳۳	۳۹/۶۷
Dari-friz88-A13	۱/۲۵	۱/۲۵	۲/۹۸	۳/۰۴	۵۱/۹۰	۵۲/۵۳	۱/۴۱	۱/۴۶	۵۹/۳۳	۴۸/۰۰
Dari-friz88-A14	۱/۲۸	۱/۳۱	۳/۲۷	۳/۲۱	۵۴/۱۰	۵۳/۲۰	۱/۸۱	۱/۵۳	۶۳/۳۳	۴۴/۰۰
Dari-friz88-A15	۱/۷۸	۱/۹۰	۴/۲۲	۴/۳۲	۶۱/۲۰	۶۰/۸۷	۲/۰۳	۱/۸۸	۶۵/۳۳	۵۱/۳۳
F-A1-1	۰/۸۱	۰/۶۹	۱/۶۳	۱/۴۵	۴۰/۶۷	۳۹/۸۳	۰/۶۸	۰/۶۰	۶۷/۶۷	۳۷/۰۰
F-A1-2	۱/۰۱	۰/۸۶	۲/۰۳	۱/۵۲	۴۷/۱۷	۴۲/۱۷	۰/۸۰	۰/۵۸	۴۱/۶۷	۳۶/۳۳
F-A2-11	۱/۲۱	۱/۰۹	۲/۷۹	۲/۵۲	۳۴/۰۳	۳۳/۰۷	۱/۲۷	۱/۰۲	۴۵/۰۰	۳۹/۶۷
F-A3-2	۱/۵۴	۰/۹۵	۳/۷۱	۲/۴۵	۶۳/۰۷	۵۹/۸۷	۱/۶۷	۱/۲۲	۵۳/۳۳	۴۳/۶۷
F-A3-3	۰/۶۴	۰/۴۱	۱/۵۰	۱/۲۸	۵۰/۳۳	۵۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۶۹	۵۸/۶۷	۴۴/۶۷
F-A3-12	۱/۱۰	۱/۰۶	۲/۰۵	۱/۷۹	۴۰/۲۷	۳۸/۲۷	۰/۷۵	۰/۵۶	۸۰/۰۰	۲۶/۰۰
F-PRBYT-29	۱/۵۲	۱/۲۳	۳/۱۲	۲/۶۱	۴۹/۸۰	۴۸/۷۳	۱/۳۳	۱/۱۰	۷۲/۰۰	۶۳/۰۰
F-ERB-84-11	۱/۶۶	۰/۹۶	۳/۷۳	۲/۳۰	۵۳/۴۰	۵۰/۸۰	۱/۵۶	۱/۰۹	۸۱/۰۰	۶۹/۰۰
F-ERB-84-5	۱/۰۳	۰/۷۳	۲/۶۶	۱/۸۸	۵۶/۹۰	۵۳/۴۷	۱/۳۶	۰/۹۴	۸۲/۳۳	۶۲/۶۷
F-ERB-84-6	۱/۵۸	۰/۹۲	۳/۶۸	۲/۲۹	۵۷/۶۳	۵۳/۶۷	۱/۷۱	۱/۱۷	۶۱/۰۰	۵۳/۵۷
F-ERB-85-5	۱/۵۷	۰/۹۸	۳/۷۹	۲/۳۰	۵۹/۰۷	۵۳/۸۷	۱/۸۸	۱/۱۰	۶۰/۰۳	۵۴/۹۳
F-ERB-85-7	۱/۴۵	۱/۲۵	۳/۲۲	۲/۸۹	۵۵/۷۳	۵۳/۶۰	۱/۵۹	۱/۳۸	۵۸/۲۷	۴۸/۹۳
F-ERB-85-10	۱/۱۳	۰/۶۸	۲/۷۵	۱/۷۱	۵۵/۵۷	۵۲/۱۷	۱/۳۴	۰/۸۴	۴۹/۱۳	۳۸/۶۷
F-ERB-86-7	۰/۶۳	۰/۵۷	۱/۴۷	۱/۱۴	۵۲/۷۳	۴۵/۳۰	۰/۶۸	۰/۳۶	۴۹/۱۳	۳۸/۹۰
جو لخت-۹	۱/۴۵	۱/۳۸	۳/۰۷	۳/۲۰	۳۳/۱۳	۳۳/۹۳	۱/۲۳	۱/۳۲	۵۲/۶۷	۴۸/۳۰
جو لخت-۱۸	۱/۲۲	۱/۱۴	۲/۴۰	۲/۷۱	۳۸/۷۷	۴۰/۷۰	۰/۸۲	۰/۸۹	۴۸/۷۷	۴۲/۳۰
بهمن	۰/۹۸	۰/۹۳	۲/۱۱	۱/۷۲	۲۸/۳۷	۲۶/۲۷	۰/۸۶	۰/۵۵	۴۳/۵۰	۳۶/۳۳
ینسیوی	۱/۳۸	۱/۰۵	۳/۳۵	۲/۵۲	۵۸/۹۰	۵۷/۸۳	۱/۶۳	۱/۲۹	۵۹/۷۷	۵۳/۵۷
صحرا	۱/۰۵	۰/۸۶	۲/۳۵	۲/۰۱	۳۶/۷۷	۳۶/۰۷	۱/۱۰	۰/۹۳	۵۲/۰۳	۴۲/۶۰
قره آرپا	۲/۸۷	۲/۲۴	۶/۷۵	۵/۰۳	۵۸/۲۰	۵۳/۸۰	۳/۱۸	۲/۵۳	۶۱/۳۰	۵۴/۰۰
دشت	۱/۲۰	۱/۰۱	۲/۶۰	۲/۲۳	۳۶/۸۷	۳۲/۶۷	۱/۱۱	۰/۹۷	۴۹/۷۷	۳۵/۳۳
دایتون رانی	۱/۵۹	۱/۵۱	۳/۵۷	۳/۴۴	۵۴/۴۷	۵۴/۶۰	۱/۶۷	۱/۵۵	۵۹/۷۷	۵۳/۰۷
آبیدر	۱/۴۲	۱/۳۰	۳/۲۲	۳/۰۸	۵۶/۷۰	۵۵/۷۰	۱/۴۹	۱/۴۵	۶۰/۶۳	۵۰/۹۳
سهند	۱/۵۹	۱/۵۹	۳/۸۶	۳/۹۵	۵۵/۵۰	۵۶/۸۳	۱/۷۲	۱/۸۶	۶۱/۵۰	۵۳/۷۳
LSD	۰/۳۸		۰/۶		۳/۲۶		۰/۵		۹/۴۷	



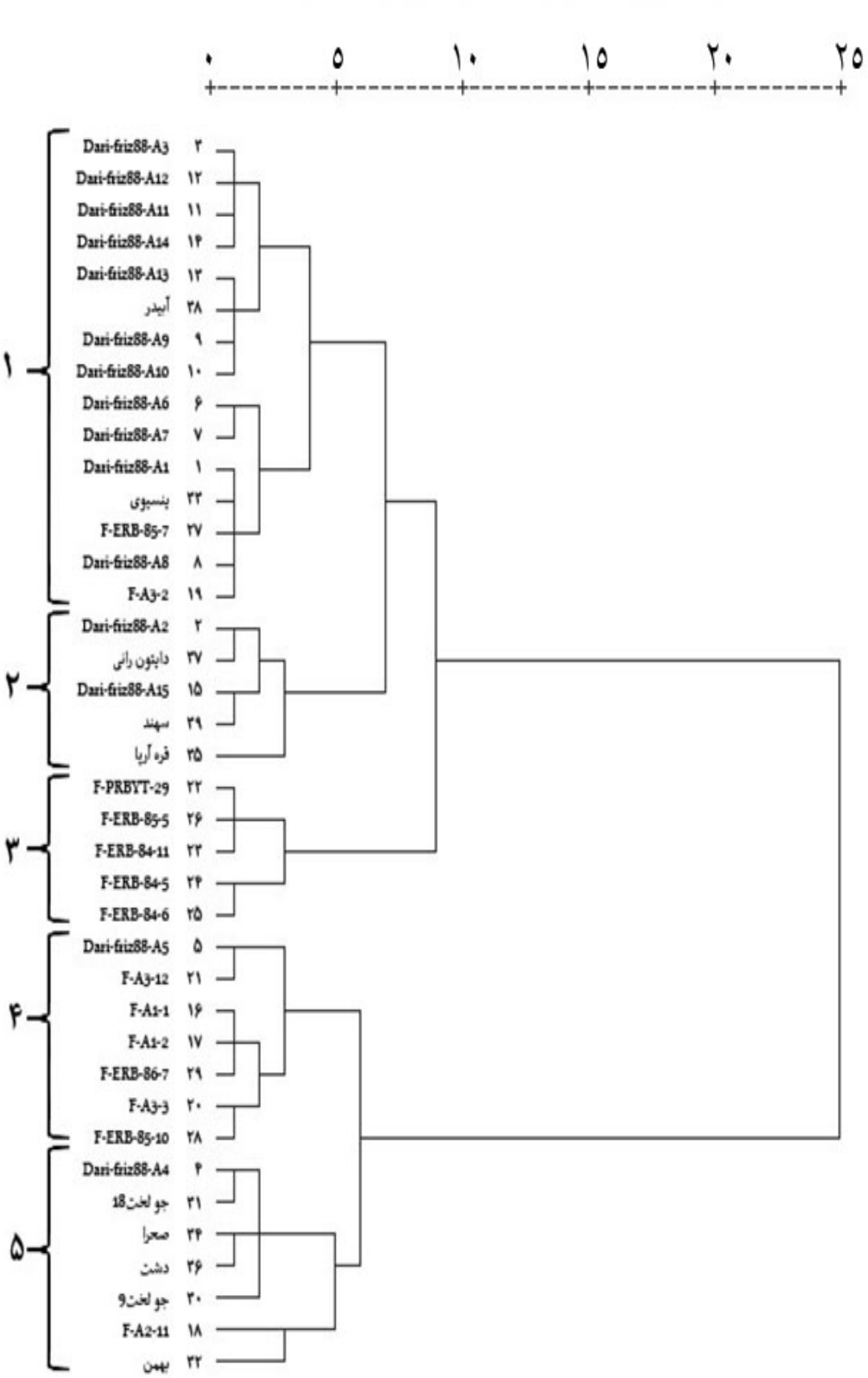
شکل ۲ – مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های جو مورد مطالعه از نظر میزان کادمیم ساقه- برگ با روش دانکن در سطح احتمال یک درصد



شکل ۱ – مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های جو مورد مطالعه از نظر میزان کادمیم دانه با روش دانکن در سطح احتمال یک درصد

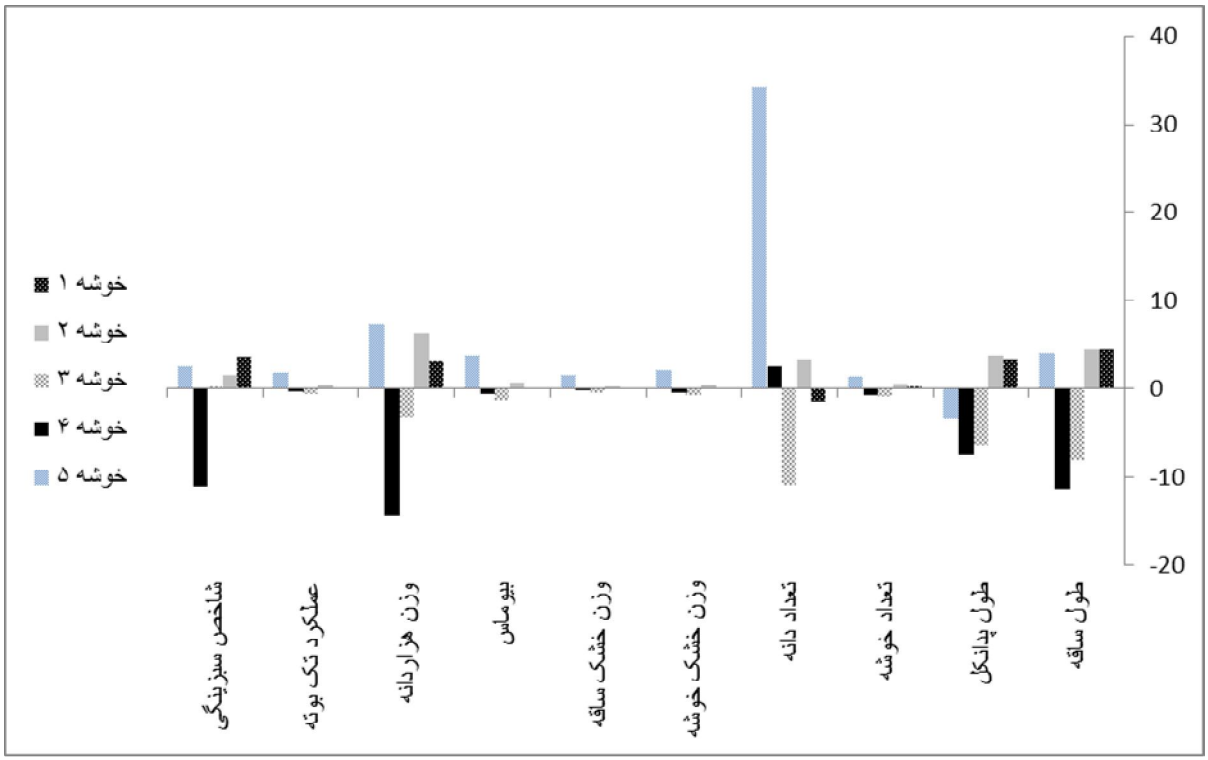


شکل ۳- گروه‌بندی ژنوتیپ‌های جو بر اساس صفات اندازه‌گیری‌شده به روش وارد در سطح شاهد

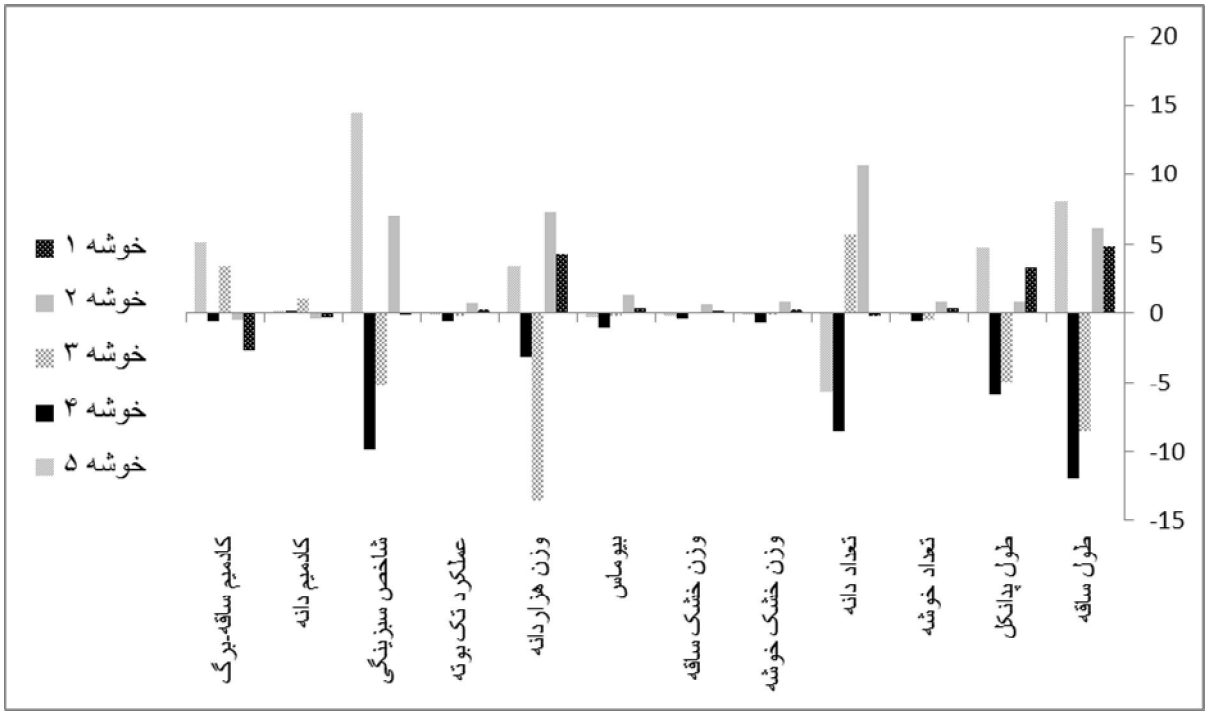


شکل ٤- گروه‌بندی ژنوتیپ‌های جو بر اساس صفات اندازه‌گیری‌شده به روش وارد در سطح تنش کادمیم

برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، تجزیه خوشه‌ای به روش وارد در سطح شاهد و تنش کادمیم به طور جداگانه انجام شد. در فاصله ۵ از نمودار درختی در سطح شاهد و تنش کادمیم ژنوتیپ‌ها به ۵ گروه مختلف تقسیم شدند (شکل‌های ۳ و ۴). به منظور تعیین خصوصیات هر گروه از نظر صفات مورد بررسی، میانگین هر گروه برای هر صفت و انحراف از میانگین کل صفت محاسبه گردید. در سطح شاهد میانگین ژنوتیپ‌های گروه دوم در تمامی صفات بیشتر از میانگین کل بود. در گروه سوم تمامی صفات غیر از شاخص سبزینگی، دارای میانگین کمتری نسبت به میانگین کل بودند (شکل ۵). لذا، گروه دوم مطلوب‌ترین گروه و گروه سوم در سطح شاهد نسبت به سایر گروه‌ها نامطلوب‌تر بودند. در سطح تنش کادمیم، گروه دوم مطلوب‌ترین گروه بود. زیرا، از یک طرف ژنوتیپ‌هایی که در این گروه بودند، دارای بیشترین مقادیر برای صفات مربوط به عملکرد و اجزاء عملکرد بودند، از طرفی کمترین میزان تجمع کادمیم دانه را داشتند. ژنوتیپ‌های گروه سوم دارای بیشترین میزان تجمع کادمیم دانه بودند و غیر از صفات تعداد دانه و میزان کادمیم ساقه- برگ، بقیه صفات در این گروه کمتر از میانگین کل بودند. همچنین، کمترین وزن هزار دانه مربوط به این گروه بود (شکل ۶). در نتیجه گروه سوم از بقیه گروه‌ها نامطلوب‌تر بود. زیرا، ژنوتیپ‌های مربوط به این گروه دارای بیشترین تجمع کادمیم در دانه بودند و در مورد صفات مطلوب نیز مقادیر پایینی داشتند. ژنوتیپ‌های گروه پنجم دارای بیشترین میزان کادمیم موجود در ساقه- برگ‌ها و بیشترین میانگین برای صفات طول ساقه و پدانکل بودند، که شاید بیانگر این باشد که ژنوتیپ‌هایی که دارای بیشترین میزان ذخیره کادمیم در برگ و ساقه هستند، بیشترین مقادیر طول ساقه و پدانکل را دارا می‌باشند. پس کادمیم باعث تحریک رشد طولی شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، عناصر سنگین با غلظت کم، باعث تحریک رشدی گیاه می‌شوند. لازم به ذکر است که، غلظت کادمیم مورد استفاده در این آزمایش نیز پایین بود و کادمیم در غلظت کم، باعث تحریک رشد جو گرد. این تحریک رشدی اغلب مربوط به ژنوتیپ‌هایی بود که میزان تجمع کادمیم بیشتری داشتند. نتایج تجزیه خوشه‌ای تنوع قابل ملاحظه‌ای به خصوص از نظر تجمع کادمیم در دانه و کاه در ژنوتیپ‌های مورد بررسی نشان داد. لذا، می‌توان ژنوتیپ‌هایی از گروه دوم مانند لاین ۱۸ و رقم بهمن با لاین‌های ۲ و ۱۵ و رقم سهند از گروه پنجم که در دو حد نهایی از نظر تجمع کادمیم دانه قرار داشتند را انتخاب نمود و در کارهای اصلاحی به عنوان والدین جهت ایجاد تنوع ژنتیکی بیشتر در نسل‌های در حال تفکیک به منظور کاهش تجمع کادمیم در دانه جو استفاده کرد.



شکل ۵- نمودار انحراف از میانگین صفات در ۵ خوشه حاصل از تجزیه خوشه‌ای به روش وارد در سطح شاهد



شکل ٦- نمودار انحراف از میانگین صفات در ٥ خوشه حاصل از تجزیه خوشه‌ای به روش وارد در سطح تنش کادمیم

نتیجه‌گیری

به‌عنوان نتیجه کلی می‌توان اظهار داشت که بین ژنوتیپ‌های جو مورد بررسی، از لحاظ صفت تجمع کادمیم تنوع قابل توجهی وجود داشت. بیشترین میزان کادمیم دانه مربوط به لاین شماره ۱۸ (F-A2-11) بود. رقم بهمن نیز از لحاظ میزان کادمیم دانه در رتبه‌ی بعد قرار داشت. لذا، این دو ژنوتیپ برای کاشت در اراضی آلوده به کادمیم جهت برداشت محصول مناسب نیستند. ضمن این که در دانه تعدادی از ژنوتیپ‌ها میزان کادمیم صفر بود. در نتیجه، از ژنوتیپ‌های مذکور می‌توان برای کاشت در اراضی آلوده به منظور برداشت محصول استفاده کرد، مشروط بر این که ارزیابی آن‌ها در غلظت‌های مختلف و در شرایط مزرعه‌ای نیز انجام گیرد و نتایج مشابه این تحقیق بدست آید. همچنین، می‌توان از تنوع موجود بین ژنوتیپ‌ها در کارهای دورگ‌گیری جهت ایجاد تنوع ژنتیکی بیشتر در نسل‌های در حال تفکیک و گزینش به منظور کاهش تجمع کادمیم در دانه جو استفاده نمود.

منابع

۱- ثواقبی، غ. ر. و م. ج. ملکوتی. ۱۳۷۹. اثرات روی و کادمیم بر غلظت عناصر و ترکیب شیمیایی دانه گندم. مجله آب و خاک، ویژه نامه کشاورزی پایدار، مؤسسه تحقیقات آب و خاک ۹(۱۲): ۵۴-۶۵.

2- Arduini, I., A. Masoni, M. Mariotti, and L. Ercoli. 2004. Low cadmium application increase miscanthus growth and cadmium translocation. Environmental and Experimental Botany, 52: 89-100.

3- Beyersmann D. 2002. Effect of carcinogenic metal on gene expression. Toxical Letter, 127: 63-68.

4- Ci, D., D. Jiang, B. Wollenweber, T. Dai, Q. Jing and W. Cao. 2010. Genetic variance in cadmium tolerance and accumulation in wheat materials differing in ploidy and genome at seedling stage. Journal of Agronomy andCrop Science, 196: 302-310.

5- Dudjak, J., J. Lachman, D. Miholova, D. Kolihova and V. Pivec. 2004. Effect of cadmium on polyphenol content in young barley plants (*Hordeum vulgare* L.). Plant Soil and Environment, 11: 471-477.

6- Eriksson, J., I. Oborn, G. Jansson, and A. Andersson. 1996. Factors influencing Cd-content in crops. Results from Swedish field Investigations. Swedish Journal of Agricultural Research, 26: 125–133.

7- Esfandiari, E., M. Shokrpour, and S. Alavi-Kia. 2010. Effect of Mg deficiency on antioxidant enzymes activities and lipid peroxidation. Journal of Agricultural Science, 3: 131-136.

8- Graham, R. D., R. M. Welch, D. A. Saunders, I. Ortiz-Monasterio, H. E. Bouis, and M. Bonierbale. 2007.

Nutritious subsistence food systems. Advanced Agriculture, 92: 69–74.
9- Greger, M. and M. Lofstedt. 2004. Comparison of Uptake and Distribution of Cadmium in Different Cultivars of Bread and Durum Wheat. Crop Science, 44: 501–507.
10- Hall, J. L. 2002. Cellular mechanism for heavy metal detoxification and tolerance. Journal of experimental botany, 53: 1-11.
11- Golldack, D. and V. J. K. Dietz. 2003. Expression of subtilisin-like serin proteases in *Arabidopsis thaliana* is cell-specific and responds to jasmonic acid and heavy metals with developmental differences. Physiologia Plantarum, 118: 64-73.
12- Hassan, M. J., G. Zhang, F. Wu, K. Wei, and Z. Chen. 2005. Zinc alleviates growth inhibition and oxidative stress caused by cadmium in rice. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168: 255-261.
13- Hassan, M. J., Z. Zhu, B. Ahmad, and Q. Mahmood. 2006. Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. Caspian Journal of Environmental Science, 4(1): 1-8.
14- Howden, R., C. R. Andersen, P. B. Goldsbrough, and C. S. Cobbet. 1995. Cadmium-sensitive, glutathione mutant of *Arabidopsis thaliana*. Plant Physiology, 107: 1067-1073.
15- Jianguo, L., Q. Min, C. Guoliang, Y. Jianchang, and Z. Qingsen. 2006. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain. Journal of Hazardous Materials, 143: 443–447.
16- Kennedy, C. D. and F. A. N. Gonsalves. 1987. The action of divalent zinc, cadmium, mercury, copper and lead on the transroot potential and H+ efflux of excised roots. Journal of Experimental Botany, 38: 800-817.
17- Khan, N. A., S. Singh, and R. Nazar. 2007. Activities of antioxidative enzymes, sulphur assimilation, photosynthetic activity and growth of wheat cultivars differing in yield potential under cadmium stress. Journal of Agriculture and Crop Science, 193: 435-444.
18- Kinraide, T. B., P. R. Ryan, and L. V. Kochian. 1992. Interactive effects of Al3+, H+ and other actions on root elongation considered in terms of cell-surface electrical potential. Plant Physiology, 99: 1461-1468.
19- Lee, S. H., S. S. Jew, P. S. Chang, I. J. Hong, E. S. Hwang, K. S. Kim, and K. T. Kim. 2003. Free radical scavenging effect and antioxidant activities of barley leaf blades. Food Science and Biotechnology, 12: 268–273.
20- Mane, A. V., R. Sankpal, and S. Ambawade. 2010. Cadmium chloride induced alteration in growth and cadmium accumulation in Triticum aestivum. International Journal of Pharmaceutical Chemistry, 5: 206-215.
21- Prince, W. S., P. Senthil Kumar, K. D. Doberschutz, and V. Subburam. 2002. Cadmium toxicity in mulberry plants with special reference to the nutritional quality of leaves. Journal of Plant Nutrient, 25: 689 –700.
22- Perriguey J., T. Sterckeman, and J. L. Morel. 2007. Effect of rhizosphere and plant related factors on the cadmium uptake by maize (*Zea mays* L.). Environmental and Experimental Botany, 10: 201-215.
23- Qian, H., J. Li, L. Sun, W. Chen, G. D. Sheng, W. Liu, and Z. Fu. 2009. Combined effect of copper and cadmium on *Chlorella vulgaris* growth and photosynthesis-related gene transcription. Aquatic Toxicology, 94: 56–61.
24- Romero-Puertas, M. C., M. Rodriguez-Serrano, F. J. Corpas, M. Gomez, L. A. delRio and L. M. Sandalio. 2004. Cadmium-induced subcellular accumulation of O^{2-} and H_2O_2 in pea leaves. Plant Cell and Environment, 27: 1122-1134.
25- Sandalio, L. M., H. C. Dalurzo, M. Gomes, M. Romero-Puertas, and L. A. DelRio. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. Journal of Experimental Botany, 52: 2115–2126.
26- Shanker, A. K., C. Cervantes, H. Loza-Tavera, and S. Avudainayagam. 2005. Cadmium toxicity in plants. Environment International, 31: 63-68.
27- Shi, G. R. and Q. S. Cai. 2008. Photosynthetic and anatomic responses of peanut leaves to cadmium stress. Photosynthetica, 46(4): 627–630.
28- Tamas, L., J. Huttova, and I. Mistrik. 2003. Inhibition of Al-induced root elongation and enhancement of Al induced peroxidase in Al-sensitive and Al-resistant barley cultivars are positively correlated. Plant Soil, 250: 193–200.
29- Vassilev, A. and I. Yordanov. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium–treated plants: A review. Plant Physiology, 23(3-4): 114-133.
30- Vassilev, A., I. Yordanov, and T. Tsonev. 1998. Physiological responses of two barley cultivars to soil pollution with cadmium. Environmental Pollution, 100: 1–7.
31- Vassilev, A. and P. Manolov. 1999. Chlorophyll fluorescence of barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings grown in excess of Cd. Bulg. Journal of Plant Physiology, 25: 67-76.
32- Vassilev, A. 2003. Barley seedlings as bio-indicators for water contamination by cadmium. Journal of Environmental Protection and Ecology, 4(2): 354-360.
33- Vassilev, A. 2003. Physiological and agro ecological aspects of cadmium interactions with barley plants: An overview. Journal of Central Europian Agriculture, 4(1): 65-76.
34- Vecera, Z. 1999. Additional comments about trace elements in crop plants. Academy of Science, Czech Republic, Brno, veveri, 97: 61-142.
35- Wang, H., S. C. Zhao, R. L. Liu, W. Zhou, and J. Y. Jin. 2009. Changes of photosynthetic activities of maize (*Zea mays* L.) seedlings in response to cadmium stress. Photosynthetica, 47(2): 277-283.

36- Woodies, T. C., G. B. Hunter, and F. J. Johnson. 1977. Statistical studies of matrix effects on the determination of cadmium and lead in fertilizer and material and plant tissue by flame atomic absorption spectrophotometry. Analytica Chemica Acta, 90:127-136.
37- Wong, S. C., X. D. Li, G. Zhang, S. Qi, and Y. S. Min. 2002. Heavy metals in agriculture soils of the Pear River Delta, South China. Environmental Pollution, 119: 33-44.
38- Wu, F. B. and G. P. Zhang. 2002. Alleviation of cadmium-toxicity by application of zinc and ascorbic acid in barley. Journal of Plant Nutrients, 25: 2745-2761.
39- Wu, F. B., G. P. Zhang, and P. Dominy. 2003. Four barley genotypes respond differently to cadmium. Lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. Environmental and Experimental Botany, 50: 67–78.