

تأثیر پرایمینگ بذر و کادمیوم بر صفات فیزیولوژیک گیاهچه و شاخص‌های جوانه‌زنی بذرهای تولیدشده سورگم (*Sorghum bicolor* L.) ژنوتیپ SOR834

عبدالحسین رضائی^۱، حمیدرضا بلوچی^{۲*}، محسن موحدی دهنوی^۲، ابراهیم ادهمی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و فناوری بذر گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه یاسوج.

۲. دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه یاسوج.

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه یاسوج.

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۱۶

چکیده

امروزه آلودگی خاک به فلزات سنگین در نتیجه فعالیت‌های انسانی یکی از تنش‌های محیطی مهم در گیاهان بوده، که می‌تواند به تولید گونه‌های اکسیژن فعال منجر شود. پرایمینگ با اسید جیبرلیک، اسید سالیسیلیک و نیترات پتاسیم به‌عنوان یک گزینه مناسب برای کاهش اثرات سمی کادمیوم در نظر گرفته شده است. این مطالعه با هدف بررسی اثر پرایمینگ بر برخی صفات فیزیولوژیکی گیاه و شاخص‌های کیفی بذر سورگم تحت تنش کلرید و نیترات کادمیوم در سال ۱۳۹۴ در دانشگاه یاسوج انجام شده است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول شامل اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار، نیترات پتاسیم ۱٪ و شاهد (بدون پرایم) و فاکتور دوم شامل سطوح کلرید و نیترات کادمیوم هر کدام در چهار سطح (۰، ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. نتایج نشان داد که اثر متقابل کادمیوم و پرایمینگ برای پروتئین محلول در آب، آنزیم کاتالاز، آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز و ارتفاع بوته معنی‌دار بود. اثر کادمیوم نشان داد که ۳۰ میلی‌گرم کلرید کادمیوم به ازای هر کیلوگرم خاک وزن دانه را نسبت به شاهد ۲۴ درصد کاهش داد. به‌طور کلی تمام سطوح کادمیوم نسبت به شاهد (بدون کادمیوم) اثر کاهنده بر روی وزن دانه داشتند. پرایمینگ بذر با ۰/۳ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک منجر به افزایش سرعت جوانه‌زنی و شاخص طولی بنبه بذر سورگم تحت تنش کادمیوم گردید. همچنین بیشترین شاخص وزنی بنبه در ۱۵ میلی‌گرم کلرید و نیترات کادمیوم به ازای هر کیلوگرم خاک مشاهده شد و کمترین شاخص وزنی بنبه به ۷/۵ و ۳۰ میلی‌گرم کلرید کادمیوم به ازای هر کیلوگرم خاک تعلق داشت. در کل، پرایمینگ بذر با ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید جیبرلیک، و ۰/۳ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با بهبود شاخص‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گیاه مادر از جمله افزایش محتوای پروتئین محلول و کلروفیل برگ می‌تواند باعث مقاومت نهال سورگم به سمیت کادمیوم و بهبود رشد آن و افزایش وزن دانه گردد. در نتیجه بذور تولیدی در این شرایط دارای سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنبه بذر بیشتری نسبت به شاهد (عدم استفاده از پرایمینگ) هستند.

واژگان کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، جوانه‌زنی، اسید جیبرلیک، اسید سالیسیلیک، فلزات سنگین

مقدمه

خاک می‌گردند (Yandy et al., 2007). فلزات سنگین از منابع مختلفی به‌طور طبیعی وارد محیط‌زیست می‌شوند، اما در این میان آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های بشری نظیر احداث کارخانه‌های صنعتی، سوخت‌های فسیلی، فاضلاب‌های صنعتی و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و آلی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند (Groppa et

گیاهان دارای پتانسیل تولید بالایی هستند، ولی هنگامی که یون‌های فلزات سنگین در سطوح بالا در محیط وجود داشته باشد، بیش‌ازاندازه توسط ریشه گیاه جذب و به اندام‌های هوایی منتقل گشته و انباشته می‌شوند که منجر به صدمات متابولیسمی و کاهش رشد و عملکرد گیاه گردیده از طرف دیگر این فلزات باعث کاهش فعالیت میکروبی و حاصلخیزی

طول ساقه‌چه حدود ۸۰٪ کاهش یافت. در نهایت غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر منجر به مرگ اغلب گیاهان در انتهای هفته دوم شد. صفات جوانه‌زنی در گیاهچه‌های شش‌روزه گندم شامل داراب ۲، دوروم و استار تحت تأثیر غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار کلرید کادمیوم قرار نگرفت؛ هرچند که میانگین درصد جوانه‌زنی با افزایش غلظت فلز فوق کاهش نشان داد. در ارقام فوق با افزایش غلظت کلرید کادمیوم میانگین طول ریشه‌چه کاهش پیدا کرد و حداکثر کاهش در طول ریشه‌چه در حضور غلظت ۱۰۰ میکرومولار کلرید کادمیوم مشاهده شد. وزن خشک ریشه‌چه در حضور غلظت ۱۰۰ میکرومولار کلرید کادمیوم حداکثر کاهش را در ارقام داراب ۲ و استار نشان داد، در رقم دوروم حداکثر کاهش در وزن خشک ریشه‌چه در حضور غلظت ۱۰ میکرومولار مشاهده شد در مجموع رشد ریشه‌چه‌ها حساسیت بیشتری به سمیت کادمیوم در مقایسه با اندام‌های هوایی نشان داد (Bavi et al., 2011).

پرایمینگ بذر روشی است که به‌واسطه آن بذور پیش از قرار گرفتن در بستر خود و مواجهه با شرایط اکولوژیکی محیط، به لحاظ فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی آمادگی جوانه‌زنی را به دست می‌آورند (Ashraf and Foolad, 2005). در تحقیقی روی نخود گزارش شده است که پرایم کردن بذور با اسید سالیسیلیک باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در گیاه شده است که در مجموع باعث افزایش جوانه‌زنی می‌شود (Kaur et al., 2002). با توجه به مطالب فوق و افزایش روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع و استفاده روزافزون از کودهای فسفره در بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع کادمیوم، تجمع کادمیوم اجتناب‌ناپذیر است، لذا بررسی وضعیت کادمیوم در خاک و بذور تولیدی از نظر تعیین مدیریت فعلی و آتی سلامت جامعه و محیط‌زیست بسیار مهم است. بنابراین باید به دنبال راهکارهایی برای کاهش اثر سوء عناصر سنگین در گیاهان باشیم که استفاده از گیاهان مقاوم و انواع پرایمینگ یکی از راهکارهایی پیش رو است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر انواع پرایمینگ بذر و غلظت‌های مختلف کلرید و نیترات کادمیوم بر صفات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاهچه سورگم ژنوتیپ

(al., 2007). کادمیوم یکی از سمی‌ترین عناصر در میان فلزات سنگین است. این عنصر دوام زیستی بالایی داشته و سبب لوله‌ای شدن برگ‌ها، کلروز و کاهش رشد ریشه و ساقه می‌شود (Mishra and Dubey, 2006). میزان سمیت هر عنصر در گیاهان مختلف متفاوت بوده و بسیار پیچیده است که بستگی به گونه گیاهی، غلظت آن، اسیدیته و نوع ترکیبات خاک دارد. بسیاری از عناصر برای رشد گیاه ضروری هستند. با این وجود، مقدار بیش‌ازحد یک عنصر ضروری یا غیرضروری می‌تواند اثر مخربی بر رشد و نمو گیاه داشته باشد. بنابراین گیاهان باید عناصر ضروری را تا حد پایین‌تر از آستانه سمیت جذب و از جذب عناصر غیرضروری اجتناب ورزند (Kaphi et al., 2010). میزان کافی کادمیوم در برگ‌ها بین ۰/۲-۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک، میزان سمی در برگ‌ها ۳۰-۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک و میزان سمیت در خاک سطحی ۸۰-۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک است و غلظت بحرانی کادمیوم در خاک‌های ایران ۵۰-۳۰ میلی‌گرم بر لیتر است (Kaphi et al., 2010).

بهاردواج و همکاران (Bhardwaj et al., 2009) نیز گزارش دادند محتوای پروتئین محلول برگ در گیاه لوبیا با افزایش غلظت کادمیوم (۶ و ۸ گرم بر کیلوگرم خاک) در مقایسه با گیاهان شاهد کاهش یافت. مشایخی و همکاران (Mashayekhi et al., 2014) گزارش کردند اثر کادمیوم (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم کلرید کادمیوم در کیلوگرم خاک) بر صفات مورفولوژیکی گیاه همیشه‌بهار، کوتاه‌ترین طول ساقه همراه با کاربرد ۸۰ میلی‌گرم کلرید کادمیوم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. کاربرد تیمار کادمیوم ۸۰ نسبت به تیمارهای ۴۰ و ۳۰ به ترتیب باعث کاهش ۵/۷۵ و ۹/۳۶ درصدی طول ساقه گیاه همیشه‌بهار شد. پراتا و همکاران (Peralta et al., 2001) نشان دادند که با افزایش غلظت فلز کادمیوم در محیط کشت یونجه رقم مالون، صفات جوانه‌زنی بذر، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه کاهش یافتند. در غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم جوانه‌زنی بذر هم‌اندازه شاهد بود؛ هرچند که طول ساقه‌چه حدود ۱۷٪ کاهش یافت و طول ریشه‌چه حدود ۲۲٪ بیشتر از تیمار شاهد بود. اما در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، جوانه‌زنی بذر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، طول ریشه‌چه نیز نسبت به شاهد حدود ۶٪ کاهش یافت. در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر، جوانه‌زنی بذر حدود ۵۰٪ و

اضافه گردید. سپس گلدان‌ها با هفت کیلوگرم از خاک مذکور پر شدند و بعد از گذشت یک ماه (به‌منظور یکنواخت و همگن شدن فلز سنگین با خاک) کاشت صورت گرفت و چهار بذر سورگم ژنوتیپ SOR834 تولیدی سال ۱۳۹۳ در یاسوج پرایم شده، در گلدان‌های با سطوح مختلف کلرید و نیترات کادمیوم در تاریخ ۱۳۹۴/۱/۱۸ کشت شد. بعد از کشت یک گرم اوره (معادل ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) و یک گرم فسفر از منبع آمونیوم فسفات (معادل ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) بر اساس آزمون خاک (جدول ۱) به هر گلدان افزوده شد. همچنین در مرحله ۵ تا ۷ برگه شدن دوباره یک گرم اوره (معادل ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار) به گلدان‌ها اضافه گردید.

SOR834 و شاخص‌های کیفی بذر تولیدی در این شرایط در دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج در سال ۱۳۹۴ اجرا گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول شامل اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار، نیترات پتاسیم ۱٪ و شاهد (بدون پرایم) و فاکتور دوم شامل سطوح کلرید و نیترات کادمیوم هر کدام در چهار سطح (۰، ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود (Kaphi et al., 2010). برای اعمال تیمار کادمیوم، ابتدا خاک رس و شن را از الک نیم سانتی‌متری عبور داده و به نسبت چهار به یک مخلوط گردید. سپس کلرید و نیترات کادمیوم در چهار سطح (۰، ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) توسط افشانه به هر گلدان

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

بافت Tissue	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (ds/m)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) Phosphorus (mg/kg soil)	پتاسیم تبدالی (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) Exchangeable potassium (mg/kg soil)	نیتروژن کل (%) Total nitrogen (percent)
رسی لومی Clay loam	8.14	0.22	5.5	188	0.08

صفات مورد اندازه‌گیری

۰/۱ مولار با اسیدیته ۶/۸ یکنواخت شد و سپس به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، سانتریفیوژ شد. فاز بالایی عصاره (سوپرناتانت) به‌دست‌آمده برای اندازه‌گیری مقدار پروتئین محلول و همچنین فعالیت دو آنزیم پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز مورد استفاده قرار گرفت. جهت اندازه‌گیری کمی پروتئین از روش (Bradford, 1976) استفاده شد. برای اندازه‌گیری پروتئین محلول برگ مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میکرولیتر محلول برادفورد و ۵۰ میکرولیتر عصاره برگ بود. میزان جذب نوری عصاره در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد.

ارتفاع بوته‌های سورگم به‌وسیله‌ی خط کش در زمان برداشت در تاریخ ۹۴/۵/۲۵ اندازه‌گیری شد. همچنین در مرحله‌ی ۴ برگگی شاخص کلروفیل (با استفاده از دستگاه SPAD-502Plus) و فلورسانس کلروفیل برگ (با استفاده از دستگاه OSL-FL) از جوان‌ترین برگ بالغ اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری پروتئین محلول برگ

برای اندازه‌گیری پروتئین محلول برگ از روش کار و میشر (Kar and Mishra, 1976) و لیو و هانگ (Liu and Huang, 2000) استفاده شد. مقدار ۰/۲ گرم از بافت برگ نگهداری شده در فریزر (دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد) در هاون چینی سرد و در ظرف یخ با ۲ میلی‌لیتر از بافر فسفات

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) از برگ سورگم

۰/۱ گرم نمونه‌ی منجمد برگ در ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با pH=۶/۸ عصاره‌گیری شد.

وزن هزار دانه نیز از دو بوته در هر گلدان با ترازوی حساس با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای این کار ۱۰۰ عدد بذر را شمارش کرده و در ۱۰ ضرب شد. تعداد دانه در خوشه هم شمارش گردید.

اندازه‌گیری شاخص‌های کیفی بذرهای حاصل از سورگم تحت تنش کادمیوم

بعد از برداشت، بذرها در شرایط جوانه‌زنی استاندارد قرار گرفت و پس از شمارش بذرهای جوانه‌زده، طول ساقچه و ریشه‌چه آن‌ها با خط‌کش مدرج میلی‌متری اندازه‌گیری شد. وزن خشک ساقچه‌چه و ریشه‌چه پس از خشک شدن در آون با دمای ۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت با ترازوی حساس با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری گردید. برای محاسبه درصد جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی بذور از برنامه جرمین (Soltani and Madah, 2011) استفاده شد که در این برنامه D50 (مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به ۵۰ درصد حداکثر خود برسد) و D90 (مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به ۹۰ درصد حداکثر خود برسد) و Gu (یکنواختی جوانه‌زنی که حاصل تفاضل زمان تا ۹۰ درصد جوانه‌زنی و زمان تا ۱۰ درصد جوانه‌زنی است) را محاسبه می‌کند. این برنامه پارامترهای یادشده را برای هر تکرار و هر تیمار بذری از طریق درون یابی منحنی افزایش جوانه‌زنی در مقابل زمان محاسبه می‌کند.

$$GR = \sum \left(\frac{Ni}{Ti} \right) \quad [1]$$

Ni: تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز، Ti: تعداد روزها از زمان شروع آزمایش (Verma et al., 2005).
شاخص بنیه طولی و وزنی گیاهچه (Abdulbaki and Anderson, 1975)

[۲] طول گیاهچه $\times (100 / \text{درصد جوانه‌زنی}) =$ شاخص طولی بنیه
وزن خشک گیاهچه $\times (100 / \text{درصد جوانه‌زنی}) =$ شاخص وزنی بنیه
[۳]

محاسبات آماری

محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و Excel انجام و با توجه به نرمال نبودن توزیع داده‌ها، تبدیل داده‌های لازم صورت گرفت و مقایسه میانگین اثرات اصلی با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال

همگن‌های حاصل با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتی‌فیوژ شدند و از بخش شناور رویی برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده گردید. مخلوط واکنش شامل موارد زیر بود:

به ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با ۶/۸ pH= ۰/۵ میلی‌لیتر H_2O_2 ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد، سپس در طول موج ۲۴۰ نانومتر و توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. تجزیه H_2O_2 با کاهش جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر دنبال گردید (Cakmak and Horset, 1991) و به ازای میلی‌مولار بر میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی بیان شد. ضریب خاموشی برای کاتالاز ۰/۰۳۹۴ بر میلی‌مول بر سانتی‌متر است.

سنجش فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (SOD) از برگ سورگم

برای اندازه‌گیری فعالیت این آنزیم از روش بیوچمپ و فریدوویچ (Beauchamp and Fridovich, 1971) استفاده شد. سنجش فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز با استفاده از سنجش مهار احیاء نوری نیتروبلوترازولیوم NBT در طول موج ۵۶۰ نانومتر انجام گرفت. مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار با اسیدپتیک ۷/۵ EDTA، ۰/۱ میلی‌مولار، نیتروبلوترازولیوم ۷۵ میکرومولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، ریبوفلاوین ۴ میکرومولار (آخرین ماده افزودنی) و عصاره گیاهی بود. لوله‌های آزمایش حاوی مخلوط واکنش به مدت ۱۵ دقیقه تحت روشنایی لامپ فلورسنت با فاصله‌ی ۵۰ سانتیمتر قرار داده شدند و بلافاصله واکنش آغاز گردید. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۶۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. میزان فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در نمونه‌ها در مقایسه با شاهد روشنایی سنجیده شد. یک واحد فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز به‌عنوان مقدار آنزیمی در نظر گرفته می‌شود که منجر به مهار ۵۰ درصد احیای نوری نیتروبلوترازولیوم (NBT) می‌گردد. اختلاف جذب نمونه‌ها و شاهد روشنایی در ۵۶۰ نانومتر، مهار احیاء نوری NBT در حضور آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز موجود در نمونه‌ها را نشان داد. با استفاده از این اختلاف جذب، واحد آنزیمی (واحد بر میلی‌گرم پروتئین) نمونه‌ها محاسبه و فعالیت آنزیمی محاسبه شد، بیان گردید.

وزن هزار دانه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر کادمیوم و پرایمینگ برای وزن هزار دانه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود، اما برهمکنش آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر کادمیوم نشان داد کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک وزن هزار دانه را ۲۴ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. به‌طور کلی تمام سطوح کادمیوم نسبت به شاهد (بدون کادمیوم) اثر کاهشی بر وزن هزار دانه داشتند. وزن هزار دانه در شاهد بدون کادمیوم بیشتر از سطوح کادمیوم بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر پرایمینگ نشان داد نیترا پتاسیم ۱٪ باعث افزایش ۱۵/۷۴ درصدی وزن هزار دانه نسبت به شاهد بدون پرایم شد و همچنین اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش ۱۲/۵۸ درصدی نسبت به شاهد شد. (جدول ۵). کائور و همکاران (Khudsar et al., 2001) اظهار نمودند، فعالیت مخزن در گیاهان نخود حاصله از بذور هیدرو پرایمینگ شده در مقایسه با شاهد بالاتر بود که این امر از طریق بالاتر بودن فعالیت آنزیم‌های درگیر در متابولیسم ساکارز نظیر ساکارز سینتاز، اینورتازها و ساکارز فسفات سینتاز مشخص گردید که در نهایت افزایش وزن هزار دانه و عملکرد را به دنبال داشت.

تعداد دانه در خوشه

با توجه به جدول تجزیه واریانس اثر کادمیوم برای تعداد دانه در خوشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد، اما اثر پرایمینگ و برهمکنش آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر کادمیوم بر صفت تعداد دانه در خوشه نشان داد کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۱۲۲ و سپس نیترا کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۱۳۲ و کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۲۴۵ به ترتیب بیشترین تأثیر منفی را داشتند همچنین تیمار شاهد (بدون کادمیوم) با میانگین ۶۸۳ دارای بیشترین تعداد دانه در خوشه در گیاهچه سورگم بود که با نیترا کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۵۹۲ و نیترا کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۵۳۴ با شاهد فاقد اختلاف معنی‌دار بود که شاید دلیل اثر کمتر سطح نیترا کادمیوم نسبت به کلرید کادمیوم سمیت کمتر نیترا کادمیوم باشد (جدول ۴).

۵ درصد، و در صورت معنی‌دار شدن اثر متقابل، برش‌دهی انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون L.S.Means انجام گردید.

نتایج و بحث

ارتفاع گیاهچه سورگم

با توجه به جدول تجزیه واریانس برهمکنش کادمیوم و پرایمینگ در سطح احتمال ۱٪ برای ارتفاع نهایی گیاهچه سورگم و همچنین اثر کادمیوم در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد، اما اثر پرایمینگ فاقد اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و نیترا کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مربوط به شاهد بدون پرایم بود که به ترتیب با کاربرد اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار و اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و نیترا پتاسیم ۱٪ اختلاف معنی‌دار نداشت. با افزایش نیترا کادمیوم به ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار بیشترین ارتفاع را نشان داد که با پرایم اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌دار نداشت. در سطح بدون کادمیوم ارتفاع گیاه با کاربرد اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین افزایش را داشت که با شاهد بدون پرایم تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۳).

قادری و همکاران (Qaderi et al., 2014) گزارش کردند نیترا کادمیوم و اسید سالیسیلیک تأثیر بسیار معنی‌داری در سطح ۱٪ بر ارتفاع گیاه ریحان داشته است. به‌طوری‌که با افزایش سطح نیترا کادمیوم ارتفاع کاهش می‌یابد و بیشترین ارتفاع متعلق به تیمار شاهد می‌باشد. بنابراین کاهش ارتفاع در شرایط تنش کادمیوم ناشی از کاهش تقسیم و گسترش سلولی است ولی تأثیر اسید سالیسیلیک به‌گونه‌ای است که با افزایش غلظت این اسید ارتفاع افزایش می‌یابد. گزارش‌های متعددی مبنی بر نقش اسید سالیسیلیک در کاهش اثرات ناشی از تنش‌ها وجود دارد. اسید سالیسیلیک به دلیل داشتن گروه -OH هیدروکسیل آزاد روی حلقه بنزوئیک اسید قادر به شلاته کردن فلزات است (Choundhury and Panda, 2004).

پروتئین محلول برگ

با توجه به جدول تجزیه واریانس برهمکنش کادمیوم و پرایمینگ بر صفت پروتئین محلول برگ در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد و همچنین اثر کادمیوم در سطح احتمال ۱٪ نیز معنی‌دار شد؛ اما اثر پرایمینگ فاقد اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، در پرایم شاهد (بدون پرایم) مقدار پروتئین برگ بیشتر بود که با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار و اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌دار نداشت، اما نیترات پتاسیم ۱ درصد مقدار پروتئین برگ را نسبت به شاهد بدون پرایم کاهش داد. در سطح کلرید کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با نیترات پتاسیم ۱٪ مقدار پروتئین برگ را نسبت به شاهد بدون پرایم ۳۷ درصد افزایش داد که با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار نداشت، اما اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار پروتئین برگ را نسبت به شاهد بدون پرایم کاهش داد. در سطح

کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار پروتئین برگ را نسبت به شاهد بدون پرایم ۴۷ درصد افزایش داد که با نیترات پتاسیم ۱٪ اختلاف معنی‌دار نداشت. در سطح نیترات کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار مقدار پروتئین برگ بیشتر بود که با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شاهد (بدون پرایم) اختلاف معنی‌دار نداشت اما نیترات پتاسیم ۱ درصد مقدار پروتئین را کاهش داد. در سطح نیترات کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار پروتئین برگ را نسبت به شاهد بدون پرایم ۵۸ درصد افزایش داد که با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار و نیترات پتاسیم ۱٪ اختلاف معنی‌دار نداشت. در واقع همه تیمارهای پرایمینگ نسبت به شاهد مقدار پروتئین برگ را به‌طور معنی‌داری و به یک‌میزان افزایش دادند. در سطح نیترات کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با نیترات پتاسیم ۱٪

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر غلظت‌های مختلف کادمیوم و پرایمینگ بر صفات ارتفاع گیاهچه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در خوشه، پروتئین محلول برگ، سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، کلروفیل و فلورسانس کلروفیل برگ در گیاهچه سورگم

Table 2. variance analysis of different concentrations of cadmium and priming effect on plant height, seed weight, number of seeds per panicle, soluble protein, superoxide dismutase, catalase, chlorophyll and chlorophyll fluorescence in sorghum seedlings.

S.O.V.	منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع گیاهچه Plant height	وزن هزار دانه Grain 1000 weight	تعداد دانه در خوشه number of grains per panicle	پروتئین محلول برگ Leaf soluble protein	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	کاتالاز Catalase	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	حداکثر کارایی کوانتوم Fv/Fm
Cadmium (Cd)	کادمیوم	6	4657**	19.7**	423.3**	13.39**	1.75 ^{ns}	0.014**	40.32**	0.005 ^{ns}
Priming (P)	پرایمینگ	3	169 ^{ns}	27.7**	18.7 ^{ns}	0.91 ^{ns}	3.78*	0.018**	27.92*	0.0002 ^{ns}
Cd×P	کادمیوم×پرایمینگ	18	1120**	4.7 ^{ns}	36.7 ^{ns}	16.43**	2.43**	0.018**	14.14 ^{ns}	0.003 ^{ns}
Error	خطای آزمایشی	56	308	3.3	52.3	1.23	0.94	0.001	8.20	0.003
C.V. (%)	ضریب تغییرات (%)		14.3	12.3	40.7	15.69	27.9	30.77	8.26	7.58

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم اختلاف آماری معنی‌دار و اختلاف آماری در سطح‌های پنج و یک درصد
ns, * and **: respectively, no significant difference and the difference in five and one percent

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف پرایمینگ در سطوح مختلف کلرید و نیترات کادمیوم برای ارتفاع گیاهچه، پروتئین محلول، سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز برگ در گیاهچه سورگم

Table 3. Mean Comparison of priming different concentrations effect in different levels of cadmium chloride and nitrate for plant height, leaf soluble protein, superoxide dismutase and catalase, sorghum seedling

کادمیوم (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) Cadmium (mg/kg soil)	پرایمینگ Priming	ارتفاع (سانتی‌متر) height (cm)	پروتئین (میلی‌گرم بر گرم برگ تازه) Protein (mg/g F.L.)	سوپر اکسید دیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین) SOD (units/mg protein)	کاتالاز (میلی‌مول بر میلی‌گرم پروتئین) CAT (Mmol/mg Pro.)
شاهد (بدون کادمیوم) Control (no cadmium)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	117.67ab	7.40a	16.97ab	0.038c
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	148.33a	5.10b	14.40ab	0.286a
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	104b	4.80b	25.23a	0.123b
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	110b	6.66ab	4.02b	0.089bc
کلرید کادمیوم (۷/۵) Cadmium chloride (7.5)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	83.3a	11a	5.41a	0.149a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	96.6a	10.40a	4.27a	0.077a
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	86.6a	9.56a	8.60a	0.095a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	71.6a	5.66b	10.76a	0.109a
کلرید کادمیوم (۱۵) Cadmium chloride (15)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	151.67a	6.06b	6.61a	0.2a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	106.67b	4.40c	1362a	0.219a
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	130ab	8.63a	8.96a	0.082b
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	110.33b	9.63 a	A7.23a	0.110b
کلرید کادمیوم (۳۰) Cadmium chloride (30)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	113a	5.23 b	11.38ab	0.140a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	116.67a	10 a	3.52b	0.060b
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	148.33a	4 b	19.97a	0.155a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	145.33a	9.23a	10.03ab	0.053b
نیترات کادمیوم (۷/۵) Cadmium nitrate (7.5)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	138.33a	8.06a	14.82a	0.029a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	113.33ab	6.46a	8.05a	0.053a
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	86.67b	8.23a	3.28a	0.089a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	121.67ab	4.56b	13.12a	0.048a
نیترات کادمیوم (۱۵) Cadmium nitrate (15)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	111.33c	3.66b	18.50ab	0.306a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	140ab	8.80a	6.52b	0.093bc
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	155.67a	8.03a	24.69a	0.124b
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	116.67bc	8.46a	5.05b	0.02c
نیترات کادمیوم (۳۰) Cadmium nitrate (30)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	153.33a	7.36a	8.96a	0.062c
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l)	131.66a	4.06b	11.05a	0.184b
	سالسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار SA (0.3 mM)	158.33a	5.23b	9.73a	0.26a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	151.33a	7.46a	4.15a	0.10bc

در هر ستون و هر سطح کادمیوم وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means می‌باشد. In each column and cadmium level at least a same letter indicates the lack of significant statistically differences in 5% probability based on L.S.Means procedure.

این مطالعه با نتایج تحقیقات بهار دواج و همکاران (Bhardwaj et al., 2009) در گیاه لوبیا و مطالعات عرفان و همکاران (Irfan et al., 2013) در گیاه نخود ایرانی مبنی بر کاهش محتوای پروتئین محلول برگ با کاربرد فلز کادمیوم هم‌خوانی دارد. تنش فلزات سنگین با تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن میل ترکیبی بالایی با پروتئین داشته و سبب اکسید شدن آن‌ها می‌شوند (Khudsar et al., 2001).

موجب افزایش مقدار پروتئین برگ شد که با شاهد (بدون پرایم) تفاوت معنی‌دار نداشت، اما اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار مقدار پروتئین را کاهش دادند. در سطح بدون کادمیوم تیمار شاهد (بدون پرایم) موجب افزایش مقدار پروتئین برگ شد که با نیترات پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشت اما اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار مقدار پروتئین را کاهش دادند. (جدول ۳). نتایج

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف کلرید و نیترات کادمیوم بر صفات وزن هزار دانه، تعداد دانه در خوشه و شاخص کلروفیل در گیاهچه سورگم

Table 4. Mean comparisons of different concentrations effect of cadmium chloride and nitrate on grain weight, number of grains per panicle and chlorophyll index in sorghum seedlings

کادمیوم (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) Cadmium (mg/kg soil)	وزن هزار دانه (گرم) Grain weight (g)	تعداد دانه در خوشه The number of grains per panicle	شاخص کلروفیل Chlorophyll index
شاهد (بدون کادمیوم) Control (no cadmium)	17.37a	683a	35.08ab
کلرید کادمیوم (۷/۵) Cadmium chloride (7.5)	14.60bc	122d	35.58ab
کلرید کادمیوم (۱۵) Cadmium chloride (15)	14.62bc	401bc	34.24b
کلرید کادمیوم (۳۰) Cadmium chloride (30)	13.15c	245cd	33.91b
نیترات کادمیوم (۷/۵) Cadmium nitrate (7.5)	14.90b	132cd	36.78a
نیترات کادمیوم (۱۵) Cadmium nitrate (15)	15.33b	534ab	35.89ab
نیترات کادمیوم (۳۰) Cadmium nitrate (30)	14.32bc	592ab	31.14c

در هر ستون وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD است. In each column at least a same letter indicates the lack of significant statistically differences in the level of five percent based on the L.S.D test.

جدول ۵. مقایسه میانگین انواع پرایمینگ بر وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل گیاهچه سورگم

Table 5. Means comparison of priming types on grain weight and chlorophyll index of sorghum seedling

پرایمینگ	وزن هزار دانه (گرم) Grain weight (g)	شاخص کلروفیل Chlorophyll index
شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	13.91b	34.31b
اسید جیبرلیک (۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر) Gibberellic acid (800 mg/l)	15.66a	36.22a
اسید سالیسیلیک (۰/۳ میلی‌مولار) Salicylic acid (0.3 mM)	13.91b	34.64ab
نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	16.10a	33.46b

سوپر اکسید دیسموتاز برگ

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها برهمکنش کادمیوم و پرایم برای آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود و همچنین اثر پرایمینگ برای این صفت در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد اما کادمیوم اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). در سطح کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک میزان فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز در پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار بیشتر بود که با نیترات پتاسیم ۱٪ و شاهد (بدون پرایم) تفاوت معنی‌دار نداشت، اما اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز را نسبت به شاهد بدون پرایم کاهش داد.

در سطح نیترات کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در لیتر میزان فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز در پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار بیشتر بود که با شاهد (بدون پرایم) تفاوت معنی‌داری نداشت اما اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و نیترات پتاسیم ۱ درصد، فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز را نسبت به شاهد بدون پرایم کاهش دادند. در سطح بدون کادمیوم پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز بیشتر بود که با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شاهد (بدون پرایم) تفاوت معنی‌دار نداشت اما نیترات پتاسیم ۱٪ میزان فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز را نسبت به شاهد بدون پرایم کاهش داد (جدول ۳).

مبین و خان (Mobin and Khan, 2007) گزارش کرده‌اند که در اثر مواجهه با کادمیوم در خردل میزان سوپر اکسید دیسموتاز افزایش یافت. گیاه دارای مکانیسم‌های متفاوتی جهت حذف یا کاهش این ترکیبات مخرب است یکی از این سیستم‌های تدافعی افزایش آنتی‌اکسیدانت‌های چون آنزیم‌های پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز است که قادرند حد واسط‌های اکسیژن را حذف، خنثی یا تمیز کنند. رادیکال‌های سوپر اکسید تولیدشده با عملکرد سوپر اکسید دیسموتاز (SOD) به H_2O_2 تبدیل شده و فعالیت آنزیم‌های اسکوربات پراکسیداز (APX)، کاتالاز (CAT) و گلوکاتایون پراکسیداز (GPX) از تجمع H_2O_2 جلوگیری می‌نمایند، بنابراین تعادل بین تولید ROS و از بین رفتن آن بقاء سیستم را تضمین می‌کند (Bahmani et al., 2013).

کاتالاز برگ

بر اساس جدول تجزیه واریانس اثر کادمیوم و پرایمینگ و برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ بر میزان کاتالاز برگ سورگم معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز بیشتر بود که با شاهد (بدون پرایم) اختلاف معنی‌دار نداشت. در سطح کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار میزان فعالیت آنزیم کاتالاز بیشتر بود که با شاهد (بدون پرایم) تفاوت معنی‌دار نداشت. در سطح نیترات کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک تیمار شاهد بدون پرایم میزان فعالیت آنزیم کاتالاز بیشتر بود. در سطح نیترات کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را ۷۶ درصد نسبت به شاهد بدون پرایم افزایش داد. در سطح بدون کادمیوم پرایم با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را ۸۶ درصد نسبت به شاهد بدون پرایم افزایش داد. (جدول ۳).

پورمحمد و همکاران (Pour Mohammad et al., 2011) گزارش کردند که تیمار ارقام گندم با کلرید کادمیوم، توانست در ارقام گاسکوژن، کوهدشت و MV17 فعالیت آنزیم کاتالاز را به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد در مقایسه با شاهد کاهش دهد. اما در برگ سایر ارقام مورد مطالعه تغییر معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد در فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر اضافه شدن کادمیوم مشاهده نشد.

شاخص کلروفیل برگ

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر کادمیوم بر شاخص کلروفیل برگ سورگم در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود و همچنین اثر پرایمینگ در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد، اما برهمکنش آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر کلرید و نیترات کادمیوم بر شاخص کلروفیل در گیاهچه سورگم نشان داد که نیترات کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک مقدار شاخص کلروفیل بیشتر بود که با سطح نیترات کادمیوم ۱۵ و کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و شاهد (بدون کادمیوم) تفاوت معنی‌دار نداشت و تنها سطح نیترات کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در

به شاهد افزایش معنی‌داری نشان می‌دهد. در برهم‌کنش متقابل اسید سالیسیلیک و تری اسید جیبرلیک نسبت به شاهد افزایش نشان می‌دهد. حداکثر سرعت جوانه‌زنی در تیمار ۱۰۰ میکرومولار اسید جیبرلیک همراه با ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد و نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان می‌دهد. جمیل و رها (Jamil and Rha, 2007) طی آزمایشی بذره‌های چغندر قند را توسط هورمون اسید جیبرلیک پرایم نموده و بیان داشتند که پرایمینگ هورمونی موجب افزایش درصد نهایی جوانه‌زنی و سرعت آن گردید و مقدار جذب آب توسط بذر به هنگام جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد بسیار معنی‌دار بود و همچنین پیش‌تیمار رشد سریع‌تر گیاه را موجب شد. افضل و همکاران (Afzal et al., 2002) بیان نمودند تسریع جوانه‌زنی در بذره‌های پرایم شده می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده مثل آلفا آمیلاز، افزایش سطح شارژ انرژی زیستی در قالب افزایش مقدار ATP، افزایش سنتز DNA و RNA، افزایش تعداد و درعین‌حال ارتقای عملکرد میتوکندری باشد.

طول ریشه‌چه

بر اساس جدول تجزیه واریانس اثر کادمیوم و پرایمینگ و برهم‌کنش آن‌ها بر طول ریشه گیاهچه سورگم در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۶). بر اساس جدول مقایسه میانگین داده‌ها در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار طول ریشه‌چه را ۷۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. در سطح نیترات کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک هیچ‌کدام از پرایم‌ها با شاهد (بدون پرایم) اختلاف معنی‌دار نداشت. در سطح بدون کادمیوم پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار طول ریشه‌چه بیشتری داشت (جدول ۸).

در کل در این آزمایش پرایمینگ بذر با افزایش سرعت رشد گیاه منجر به تولید گیاهانی با بنیه بهتر در برابر تنش کادمیوم گردید که این گیاهان با تولید ماده خشک بیشتر در شرایط تنش بذور با بنیه بهتری تولید کرده لذا بذور تولیدی دارای سرعت جوانه‌زنی و طول گیاهچه بهتری هستند.

کیلوگرم خاک میزان شاخص کلروفیل را نسبت به شاهد کاهش داد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر پرایمینگ بر شاخص کلروفیل مشخص کرد تنها پرایم با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار شاخص کلروفیل را نسبت به شاهد افزایش داد و با پرایم اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۵).

کریمی و عزتی (Karimi and Ezzati, 2013) گزارش کردند با افزایش یون کادمیوم مقدار رنگیزه‌های گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که نسبت کلروفیل a نسبت به کلروفیل b و کاروتنوئیدها بیشتر کاهش می‌یابد. تأثیر کادمیوم بر رنگ‌دانه‌های گیاهی به سن برگ و نمو گیاه بستگی دارد. انتقال یون به اندام‌های هوایی و درنهایت تجمع آن‌ها در سلول‌های برگ باعث بروز علائم مورفولوژیک و فیزیولوژیک تنش یون در برگ می‌شود که از شاخص‌ترین این علائم زردی برگ است. این زردی به علت بیوسنتز ناقص کلروفیل است. بنابراین محتوای کلروفیل برگ به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

نتایج شاخص‌های جوانه‌زنی بذور حاصل از گیاهچه‌های سورگم تحت تأثیر پرایمینگ و کادمیوم

درصد جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد اثر کادمیوم و پرایمینگ و همچنین برهم‌کنش آن‌ها بر درصد جوانه‌زنی گیاه سورگم معنی‌دار نبود (جدول ۶).

سرعت جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر پرایمینگ بر سرعت جوانه‌زنی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود ولی برهم‌کنش آن‌ها و همچنین اثر کادمیوم بر این صفت فاقد اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر پرایمینگ مشخص کرد که تنها پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار نسبت به شاهد سرعت جوانه‌زنی بیشتری داشت به‌طوری‌که ۲۹/۶۵ درصد سرعت جوانه‌زنی را نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۷). محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2009) گزارش کردند سرعت جوانه‌زنی بذر، افزایش غلظت اسید جیبرلیک نسبت

جدول ۶. تجزیه واریانس اثر کلرید و نیترات کادمیوم و پرایمینگ بر صفات درصد، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی بذر و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه سورگم

Table 6. Analysis of variance of cadmium chloride and nitrate effect and priming on seed germination percentage, rate and uniformity, root and shoot length, root and shoot dry weight and, length and weight vigor index of sorghum seedling

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول ریشه‌چه Root length	طول ساقه‌چه Shoot length	وزن خشک ریشه‌چه Root dry weight	وزن خشک ساقه‌چه Shoot dry weight	شاخص طولی بنیه گیاهچه Vigor length index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Vigor weight index	یکنواختی جوانه‌زنی Uniformity of germination
کادمیوم Cadmium (Cd)	6	2.32 ^{ns}	0.12 ^{ns}	10.31 ^{**}	0.97 ^{**}	0.98 ^{**}	0.66 ^{**}	0.73 [*]	1.69 [*]	0.12 [*]
پرایمینگ Priming (P)	3	5.73 ^{ns}	0.39 [*]	10.65 ^{**}	0.25 ^{ns}	1.13 ^{**}	0.36 [*]	1.43 ^{**}	2.92 ^{**}	0.01 ^{ns}
کادمیوم×پرایمینگ Cd×P	18	3.24 ^{ns}	0.23 ^{ns}	4.22 ^{**}	1.30 ^{**}	0.54 ^{**}	0.19 ^{ns}	0.66 ^{**}	1.07 ^{ns}	0.06 ^{ns}
خطای آزمایشی Error	56	2.10	0.13	1.06	0.17	0.21	0.12	0.26	0.6	0.05
ضریب تغییرات (%) C.V. (%)		18.2	21.9	23.7	11.9	21.7	10.02	22.8	23.4	10.2

ns, * و ** به ترتیب عدم اختلاف آماری معنی‌دار و اختلاف آماری در سطح‌های پنج و یک درصد

ns, * and **: respectively, no significant difference and the difference in five and one percent

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر انواع پرایمینگ بر سرعت جوانه‌زنی بذر، وزن خشک ساقه‌چه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه سورگم

Table 7. Mean Comparison of priming type's effect on seed germination rate, shoot dry weight and vigor weight index of sorghum seedling of seed sorghum

پرایمینگ Priming	سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز) Germination Rate (seed /day)	وزن خشک ساقه‌چه (میلی‌گرم) Shoot dry weight (mg)	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Vigor weight index
شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	2.42b	11.23b	9.49b
اسید جیبرلیک (۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر) Gibberellic acid (800 mg/l)	2.91ab	12.23ab	11.81b
اسید سالیسیلیک (۰/۳ میلی‌مولار) Salicylic acid (0.3 mM)	3.44a	13.33a	15.09a
نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	2.63b	12.57ab	11.19b

وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

At least a same letter showed no significant statistically difference in the level of five percent is based on the LSD test.

رشد طولی ریشه مؤثر بوده و اثر کادمیوم بر روی رشد طولی ریشه مشهودتر از اندام هوایی بوده است. یک دلیل برای کاهش رشد گیاهچه‌ها در اثر تیمار با فلزات سنگین، می‌تواند در نتیجه کاهش سلول‌های مریستمی در ناحیه غشای سلولی و برخی آنزیم‌ها در کوتیلدون و آندوسپرم باشد. در شرایط طبیعی سلول‌ها فعال شده و شروع به ذخیره

بهمنی و همکاران (Bahmani et al., 2014) گزارش کردند در اثر تیمار با کادمیوم میزان طول ریشه‌چه ۷/۹۶ سانتی‌متر در مقایسه با شاهد کاهش یافت. همچنین نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه در تیمار با کادمیوم ۰/۴۶ نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کادمیوم به‌عنوان یک عامل بازدارنده بر روی

وزن خشک ریشه‌چه

بر اساس جدول تجزیه واریانس اثر کادمیوم و پرایمینگ و برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ برای وزن خشک ریشه‌چه سورگم معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار ۵۴ درصد وزن خشک ریشه‌چه را نسبت به شاهد بدون پرایم افزایش داد که با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر اختلاف معنی‌دار نداشت. در سطح نیترات کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با نیترات پتاسیم ۱٪ وزن خشک ریشه‌چه را ۷۴ درصد نسبت به شاهد بدون پرایم افزایش داد که با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار و اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۸). پوراکبر و اشرفی (Pourakbar and Ashrafi, 2012) بیان کردند وزن خشک ریشه‌ها با افزایش غلظت کلرید کادمیوم از صفر به ۵۰ میکرومولار کاهش یافت. در مطالعه‌ای که دمیرکایا و همکاران (Demir Kaya et al., 2006) روی آفتابگردان انجام دادند گزارش کردند که بذور تیمار شده با KNO_3 در مقایسه با بذور شاهد، به‌طور معنی داری دارای وزن گیاهچه بیشتری بودند.

وزن خشک ساقه‌چه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر کادمیوم در سطح احتمال ۱٪ و همچنین اثر پرایمینگ در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد اما برهمکنش آن‌ها برای وزن خشک ساقه‌چه معنی‌دار نشد (جدول ۶). بر اساس جدول مقایسه میانگین اثر کادمیوم بر وزن خشک ساقه‌چه نشان داد که نیترات کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک باعث افزایش معنی‌دار آن نسبت به شاهد بدون کادمیوم شد. که با کلرید کادمیوم ۱۵ و نیترات کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌دار نداشت ولی وزن خشک ساقه‌چه در کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک وزن خشک ساقه‌چه نسبت به شاهد کمتر بود (جدول ۹). مقایسه میانگین اثر پرایمینگ مشخص کرد در پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار وزن خشک ساقه‌چه بیشتر از شاهد بدون پرایم بود که با پرایم اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و نیترات پتاسیم ۱٪ اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ۷).

غذا می‌کنند. این غذا به فرم محلول تبدیل شده و به‌واسطه آنزیم آلفا آمیلاز، که نشاسته را به قند تبدیل می‌کند و عمل پروتئازی بر روی پروتئین‌ها دارد، به ریشه‌های اولیه و نوک ریشه‌ها منتقل می‌شود. بنابراین وقتی فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک به‌واسطه عناصر سنگین تحت تأثیر فرار می‌گیرند غذا به ریشه‌های اولیه و اندام هوایی نمی‌رسد و در نتیجه طول گیاهچه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این در حالی است که بعضی از محققان دیگر بیان کردند که کاهش در طول ریشه در اثر فلزات سنگین ممکن است به دلیل دخالت این عناصر در فرآیند تقسیم سلولی و در ادامه آن انحراف کروموزومی و میتوز غیرطبیعی باشد.

طول ساقه‌چه

با توجه به جدول تجزیه واریانس برهم‌کنش کادمیوم و پرایمینگ و همچنین اثر کادمیوم برای طول ساقه‌چه در گیاهچه سورگم در سطح احتمال ۱٪ نیز معنی‌دار شد، اما اثر پرایمینگ بر طول ساقه‌چه معنی‌دار نبود (جدول ۶). مقایسه میانگین داده‌ها مشخص کرد که در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار (۵۵ درصد افزایش طول ساقه‌چه) و اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر طول ساقه‌چه نسبت به شاهد بیشتر بود. در سطح کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر طول ساقه‌چه بیشتر بود که با شاهد (بدون پرایم) تفاوت معنی‌دار نداشت.

در سطح نیترات کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار طول ساقه‌چه به میزان ۲۶ درصد نسبت به شاهد بدون پرایم بیشتر بود که با پرایم اسید جیبرلیک ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر و نیترات پتاسیم ۱٪ اختلاف معنی‌دار نداشت. در سطح نیترات کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک شاهد (بدون پرایم) طول ساقه‌چه بیشتر بود که با پرایم اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ۸). رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2014) بیان کردند بیشترین رشد در طول ساقه‌چه گیاه ریخان در تیمار شاهد و کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد. همچنین کم‌ترین رشد مربوط به کادمیوم ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر بود.

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر پرایمینگ در سطوح مختلف کلرید و نیترات کادمیوم بر طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و شاخص طولی بینه گیاهچه سورگم

Table 8. Mean Comparison of priming effect in different levels of cadmium chloride and nitrate on root and shoot length, root dry weight and vigor length index of sorghum seedling

کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم خاک) Cadmium (mg/kg soil)	پرایمینگ Priming	طول ریشه‌چه (سانتیمتر) Root length (cm)	طول ساقه‌چه (سانتیمتر) Shoot length (cm)	وزن خشک ریشه‌چه (میلی گرم) Root dry weight (mg)	شاخص طولی بنیه گیاهچه Vigor length index
شاهد (بدون کادمیوم) Control (no cadmium)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	1.79b	2.96a	2.83a	2.27b
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	3.31b	3.56a	5a	4.66b
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	5.87a	3.76a	4.66a	8a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	2.53b	3.60a	2.33a	5.16ab
کلرید کادمیوم (۷/۵) Cadmium chloride (7.5)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	2.02c	1.93c	3.33bc	1.41c
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	4.23b	3.03b	4.66ab	3.88b
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	7.03a	4.38a	7.33a	11.41a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	2.21c	2.30c	1.66c	1.94bc
کلرید کادمیوم (۱۵) Cadmium chloride (15)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	6.05a	3.76a	7.33a	7.23a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	5.40a	4.03a	5a	8.55a
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	5.06a	3.06a	8a	4.85a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	6.86a	4.06a	9.66a	7.09a
کلرید کادمیوم (۳۰) Cadmium chloride (30)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	3.71a	3.63ab	4.33a	4.21a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	3.73a	3.90a	3a	4.37a
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	3.53a	3.11b	3.66a	4.74a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	3.88a	3.03b	4.66a	4.04a
نیترات کادمیوم (۷/۵) Cadmium nitrate (7.5)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	3.31a	3.02b	4.66a	3.86a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	4a	3.67ab	6a	5.84a
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	5.22a	4.11 a	7a	6.50a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	3.10a	3.70ab	3.66a	2.53a
نیترات کادمیوم (۱۵) Cadmium nitrate (15)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	4.96ab	4.06a	6.66a	7.25a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	4b	3.45a	3a	5.45a
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	6.16ab	3.58a	8.33a	7.03a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	6.56a	3.91a	5.33a	8.07a
نیترات کادمیوم (۳۰) Cadmium nitrate (30)	شاهد (بدون پرایمینگ) Control (non priming)	3.25a	4.60a	1.53b	3.67a
	جیبرلیک (۸۰۰ mg/l) GA (800 mg/l)	4.43a	2.50b	4.33a	4.51a
	سالیسیلیک ۰/۳ میلی مولار SA (0.3 mM)	4.22a	3.56ab	5.66a	6.73a
	نیترات پتاسیم (۱٪) Potassium nitrate (1%)	4.90a	3.40b	6a	6.97a

در هر ستون و هر سطح کادمیوم وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس رویه L.S.Means است.

In each column and cadmium level at least a same letter indicates the lack of significant statistically differences in 5% probability based on L.S.Means procedure.

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر کلرید و نیترات کادمیوم بر وزن خشک ساقه‌چه، شاخص وزنی بنیه گیاهچه و یکنواختی جوانه‌زنی سورگم
 Table 9. Mean comparisons of cadmium chloride and nitrate effect on shoot dry weight, vigor weight index of seedling and uniformity of germination of sorghum.

کادمیوم	غلظت کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم خاک) Concentration of cadmium (mg/kg soil)	وزن خشک ساقه‌چه (میلی گرم) Shoot dry weight (mg)	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Vigor weight index	یکنواختی جوانه‌زنی Uniformity of germination (days)
بدون کادمیوم no cadmium	0	11.50b	10.85b	5.26ab
کلرید کادمیوم (۷/۵) Cadmium chloride (7.5)	7.5	10.25b	9.16b	4.44c
کلرید کادمیوم (۱۵) Cadmium chloride (15)	15	14a	15.46a	4.76bc
کلرید کادمیوم (۳۰) Cadmium chloride (30)	30	11.83b	9.50b	5.38ab
نیترات کادمیوم (۷/۵) Cadmium nitrate (7.5)	7.5	13.83a	11.85ab	5.65a
نیترات کادمیوم (۱۵) Cadmium nitrate (15)	15	14.08a	15.23a	5.28ab
نیترات کادمیوم (۳۰) Cadmium nitrate (30)	30	10.91b	11.22ab	4.67bc

در هر ستون وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده‌ی عدم تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.
 In each column at least a same letter indicates the lack of significant statistically differences in the level of five percent based on the L.S.D test.

شاخص طولی بنیه گیاهچه

با توجه به جدول تجزیه واریانس برهمکنش کادمیوم و پرایمینگ بر بنیه طولی در سطح احتمال ۱٪ و همچنین اثر کادمیوم در سطح احتمال ۵٪ و اثر پرایمینگ در سطح احتمال ۱٪ برای این صفت نیز معنی‌دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار ۸۷ درصد و اسید جیبرلیک ۶۳ درصد شاخص طولی بنیه را نسبت به شاهد بدون پرایم افزایش دادند. بیشتر بود. شاخص طولی بنیه در سطح بدون کادمیوم در پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار ۷۱ درصد نسبت به شاهد بدون پرایم بیشتر بود که با نیترات پتاسیم ۱٪ اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ۸). رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2014) بیان کردند بیشترین شاخص بنیه بذر در گیاه ریحان مربوط به تیمار شاهد و کم‌ترین نیز مربوط به کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد داشت.

شاخص وزنی بنیه گیاهچه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر کادمیوم در سطح احتمال ۵٪ و همچنین اثر پرایمینگ در سطح احتمال ۱٪ بر شاخص وزنی بنیه گیاهچه معنی‌دار شد اما برهمکنش آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر کادمیوم نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، نسبت به شاهد شاخص وزنی بنیه بیشتری داشت که با نیترات کادمیوم ۷/۵، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌دار نداشت در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، نسبت به شاهد شاخص وزنی بنیه کمتری داشت که با نیترات کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و شاهد بدون کادمیوم اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ۹). مقایسه میانگین اثر پرایمینگ بر شاخص وزنی بنیه گیاهچه مشخص کرد پرایم با اسید سالیسیلیک ۰/۳ میلی‌مولار شاخص بنیه وزنی را ۳۷ درصد نسبت به شاهد بدون پرایم افزایش داد (جدول ۷). توکلی حسنگلو (Tavakoli Hasanaklo et al., 2015) گزارش کردند

برخوردار بود که با کلرید ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و نیترات ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌دار نداشت و در سطح نیترات کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از یکنواختی جوانه‌زنی کمتری برخوردار بود که با نیترات ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، کلرید کادمیوم ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و شاهد بدون کادمیوم اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ۹).

نتیجه‌گیری

در کل، پرایمینگ بذر با ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید جیبرلیک، و ۰/۳ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با بهبود شاخص‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک گیاه مادر از جمله افزایش محتوای پروتئین محلول و کلروفیل برگ می‌تواند باعث مقاومت نهال سورگم به سمیت کادمیوم و بهبود رشد آن و افزایش وزن دانه گردد. در نتیجه بذور تولیدی در این شرایط دارای سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه بذر بیشتری نسبت به شاهد (عدم استفاده از پرایمینگ) هستند.

افزایش غلظت کادمیوم، موجب کاهش شاخص قدرت بذر گردید، به طوری که بیشترین قدرت بذر مربوط به عدم آلودگی به کادمیوم و کمترین مقدار آن مربوط به سطح ۰/۲۵ میلی‌مولار کادمیوم بود. شاخص قدرت یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده کیفیت بذر است که آلودگی به کادمیوم آن را کاهش داد. شاخص بنیه روی کیفیت بذرها از طریق جوانه‌زنی نهایی و طول گیاهچه تأثیر می‌گذارد. بذرها که دارای شاخص قدرت بالاتری هستند، تنش‌های محیطی را بهتر تحمل می‌کنند. همچنین علاوه بر داشتن درصد جوانه‌زنی بالا، گیاهچه‌های قوی و عادی تولید می‌کنند.

یکنواختی جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه‌ی واریانس داده‌ها نشان داد اثر کادمیوم برای یکنواختی جوانه‌زنی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود ولی برهمکنش آن‌ها و همچنین اثر پرایمینگ بر این صفت فاقد اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر کادمیوم نشان داد در سطح کلرید کادمیوم ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از یکنواختی جوانه‌زنی بیشتری

منابع

- Abdulkaki, A.A., Anderson, J.D., 1975. Vigour determination in soybean seed by multiple criteria. *Crop Science*. 13, 630-633.
- Afzal, I., Ahmad, N., Basra, S.M.A., Ahmad, R., Iqbal, A., 2002. Effect of different seed vigor enhancement techniques on hybrid maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural Science*. 39, 109-112.
- Ashraf, M., Foolad, M.R., 2005. Pre-sowing seed treatment- a shotgun approach to improve germination growth and crop yield under saline and none-saline condition. *Advances in Agronomy*. 88, 223-271.
- Bahmani, R., Bihmta, M.R., Habibi, D., 2014. Genotypes tolerance to cadmium stress at germination stage. *Journal of Crop Production*. 7, 80-61. [In Persian with English Summary].
- Bahmani, R., Bihmta, M.R., Nilforooshan, B., Rezai, K., Hassibi, A.R., 2013. The effect of biofertilizers on some physiological traits in different genotypes of bean plant under cadmium stress. *Iranian Crop Sciences Congress*, 5-1. [In Persian with English Summary].
- Bavi, K.H., NickRavesh, M., Alaei, B., 2011. The effect of cadmium chloride on germination, growth and proline content in some wheat cultivars. *Journal of Plant Ecophysiology*. 2, 10-1.
- Beauchamp, C., Fridovich, I., 1971. Superoxide Dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*. 44, 276-287.
- Bhardwaj, P., Chaturvedi, A.K., Prasad, P., 2009. Effect of Enhanced Lead and Cadmium in soil on Physiological and Biochemical attributes of *Phaseolus vulgaris* L. *Nature and Science*. 7(8), 63-66.
- Bradford, M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantization of protein utilizing the principle of protein- day binding. *Annual Review of Biochemistry*. 72, 248- 254.

- Cakmak, I., Horset, W., 1991. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tip of soybean. *Plant Physiology*. 83, 463-468.
- Choundhury, S., Panda, S.K., 2004. Role of salicylic acid in regulating cadmium induced oxidative Stress in (*Oryza Sativa* L.) root. *Bula Journal of Plant Physiology*. 30(3-4), 95-110.
- Demir Kaya, M., Gamze Okc, U., Atak, M., Yakup, C., 2006. Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *European Journal of Agronomy*. 24, 291-295.
- Groppa, M.D., Tomaro, M.L., Benarides, M.P., 2007. Polyamines and heavy metal stress: the antioxidant behavior of spermine in cadmium and copper treated wheat leaves. *Bimetals*. 20, 185-195.
- Irfan, M., Hayat, S.H., Ahmad, A., Alyemeni, M.N., 2013. Soil cadmium enrichment Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 20, 1-10.
- Jamil, M., Rha, E.S., 2007. Gibberlic acid (GA₃) enhances seed water uptake, germination and early seedling growth in sugar beet under salt stress. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 10, 654-658.
- Kaphi, M., Borzooei, A., Salihi, M., Masumi, A., Nabati, J., 2010. *Physiology Environmental Stresses in Plants*. Publications University Jihad Mashhad, 502 pages. [In Persian].
- Kar, M., Mishra D. 1976. Catalase, Peroxides and poly phenol oxides activities during rice leaf senescence. *Plant Physiology*. 57, 315-319.
- Karimi, F., Ezzati, R., 2013. Effects of Cadmium on eucalyptus plant. Second National Conference on Environmental Protection and Planning. 8-1. [In Persian].
- Kaur, S., Gupta, A.K., Kaur, N., 2002. Effect of osmo- and hydropriming of chickpea seeds on seedling growth and carbohydrate metabolism under water deficit stress. *Plant Growth Regulation*. 37, 17-22.
- Khudsar, T., Mahmood uzzafar, M., Iqbal, M., 2001. Cadmium induced changes in leaf epidermis, photosynthetic rate and pigment concentrations in (*Cajanus cajan*). *Biology*. 44, 59-64.
- Liu, X., Huang, B., 2000. Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping. *Crop Science*. 40, 503-510.
- Mashayekhi, H.R., Baghaei, A.H., Gmaryan, M., 2014. Effects of cadmium on some morphological parameters of marigold (*Calendula officinalis*). The National Conference of Medicinal Plants and Sustainable Agriculture. 12-1. [In Persian].
- Mishra, S., Dubey, R.S., 2006. Inhibition of ribonuclease and protease activities in arsenic exposed rice seedlings: Role of proline as enzyme protectant. *Journal of Plant Physiology*. 163, 927-936.
- Mobin, M., Khan, N.A., 2007. Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress. *Journal of Plant Physiology*. 164, 601-610.
- Mohammadi, M., Faheemi, H., Majd, A. 2009. Effect of salicylic acid and gibberellic acid on seed germination rate lentil (*Lens culinaris* L.). *Biology Journal of Islamic Azad University of Garmsar*. 4(4), 44-33. [In Persian with English Summary].
- Peralta, J.R., Gardea-Torresdery, J.L., Tiemann, K.J., Gomez, E., Arteaga, S., Rascon, E., Parsons, J.G., 2001. Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant Growth in alfalf (*Medicago sativa* L.). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 66, 727-734.
- Pour Mohammad, A., Rostami, N., NourAean, M., Esfandiari, A. 2011. Evaluation of wheat seedlings physiological changes in response to cadmium chloride. Conference on New Findings in Environmental and Agricultural Ecosystems. 15-1. [In Persian].
- Pourakbar, L., Ashrafi, R., 2012. Effect of cadmium on the production of hydrogen peroxide and activity of antioxidant enzymes in maize. *Journal of Tarbyatmoalem*. 9, 484-473. [In Persian with English Summary].
- Qaderi, A.A., Shahrokhi Sardo, A., Mehdiinezhad, N., Bagheri, A.A., 2014. The effect of different levels of cadmium and salicylic acid on some morphological characteristics of Basil. The first national conference on sustainable management of

- soil resources and the environment, martyr Bahonar University, 6-1. [In Persian].
- Rasouli, D., Fakheri, B., Frhadvnd, C., 2014. Effects of Cadmium on the germination and growth of Basil (*Ocimum basilicum*). First International Congress and the Thirteenth National Congress of Agronomy and Crop Breeding and Seed Science and Technology, 4-1. [In Persian with English Summary].
- Soltani, A., Madah, V., 2011. Simple to education in the agricultural applications. Ecological Society of martyr Beheshti University Press, 80 pages. [In Persian].
- Tavakoli Hasanaklo, H., Ebadi, A., Tavakoli Hasanaklo, N., Prmon, GH., 2015. Effect of glycine betaine on lowering treatment with cadmium stress during seed germination and seedling growth of black cumin (*Nigella sativa*). Plant Process and Function. 4(11), 13-1. [In Persian with English Summary].
- Verma, S.K., Bjpai, G.C., Tewari, S.K., Singh, J., 2005. Seedling index and yield as influenced by seed size in pigeon pea. Legume Research. 28(2), 143-145.
- Yandy, J.H., Zhenli, E., Xiaoe, Y., 2007. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Journal of Zhejiang University Science B (Biomedicine & Biotechnology). 8, 192-207.