

تأثیر محلول پاشی اکسید روی نانو و غیر نانو بر برخی صفات فیزیولوژیک و عملکرد علوفه سورگوم در شرایط تنش کم آبیاری

معصومه خالق دوست^۱، حسن مکاریان^{۲*}، حمید عباس دخت^۲، مهدی برادران فیروزآبادی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

* مسئول مکاتبه: h.makarian@yahoo.com

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.390869.1332

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

چکیده

به منظور مطالعه اثر فرم اکسید نانو و غیر نانو روی برخی از صفات فیزیولوژیک و عملکرد علوفه سورگوم در شرایط کم آبیاری، آزمایشی در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش عبارت بودند از دور آبیاری در دو سطح ۱۰ و ۲۰ روز که در پلات‌های اصلی و ترکیبی از فاکتورهای رقم سورگوم در سه سطح ارسک، اسپیدفید و پگاه و محلول پاشی روی در سه سطح عدم کاربرد، کاربرد اکسید روی به دو شکل نانو و غیر نانو ذرات در پلات‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش دور آبیاری از ۱۰ به ۲۰ روز صفات مختلف فیزیولوژیک، کیفی و کمی سورگوم بطور معنی داری کاهش یافت. کاربرد اکسیدروی به فرم نانو و غیر نانو سبب افزایش معنی دار رنگدانه‌های فتوسنتزی، پرولین، عملکرد علوفه‌تر و خشک در شرایط تنش کم آبیاری گردید. کاربرد فرم معمولی و نانو اکسیدروی در شرایط تنش کم آبیاری بترتیب سبب افزایش ۳۲/۴۹ و ۳۷/۵۸ درصدی عملکرد علوفه تر نسبت به شاهد گردید. در بین ارقام مورد بررسی رقم محلی ارسک بیشترین و پگاه کمترین مقادیر رنگدانه‌های فتوسنتزی و عملکرد علوفه را به خود اختصاص دادند. براساس نتایج این پژوهش، استفاده از روی به فرم نانو و یا معمولی در برنامه تغذیه‌ای سورگوم، از طریق تعدیل اثرات زیان‌بار تنش کم آبی سبب بهبود رشد و عملکرد کمی و کیفی سورگوم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغذیه گیاه، تنش خشکی، پرولین، نانو کودها

مقدمه

آن در تأمین علوفه دام‌ها در شرایط خشکسالی توجه بیش از پیش به این گیاه را می‌طلبد. در مطالعات مختلف پژوهشگران اذعان داشته‌اند که کمیت و کیفیت این گیاه علوفه‌ای تحت تأثیر تنش خشکی کاهش می‌یابد (Sarshad et al., 2021). از این رو اتخاذ تدابیر زراعی و استفاده از روش‌های تعدیل کننده تنش ناشی از کمبود آب در تولید پایدار محصولات کشاورزی امری ضروری به نظر می‌رسد.

کارایی مصرف آب و عملکرد گیاه زراعی علاوه بر مقدار آب آبیاری، به فواصل بین دو آبیاری نیز وابسته است. پژوهشگران نشان داده‌اند که گاهی افزایش فاصله بین دو آبیاری کاهش عملکرد معنی داری نسبت به فواصل آبیاری معمول ایجاد نمی‌کند. گاهی نیز افزایش فواصل بین دو آبیاری توام با کاربرد تعدیل کننده‌های تنش خشکی جبران کاهش رطوبت خاک را به همراه دارد و می‌تولند تحمل گیاه زراعی را به تنش کم آبیاری افزایش دهد (Zhang et al., 2019).

سورگوم با نام علمی *Sorghum bicolor* (L.) Moench گیاهی چهار کربنه می‌باشد که از نظر اهمیت در بین پنج غله مهم دنیا قرار دارد و دارای مصارف مختلف غذایی، علوفه‌ای و صنعتی می‌باشد (Ananda et al., 2020). علاوه بر توده‌های محلی سورگوم که از دیرباز در مناطق مختلف ایران کشت می‌شوند، ارقام مختلفی از این گیاه با ارزش در ایران تولید شده‌اند که ویژگی‌های متفاوتی از نظر مقاومت به شرایط نامساعد محیطی از جمله کم آبی و غیره دارند و می‌توانند در فواصل آبیاری طولانی‌تر عملکرد قابل قبولی داشته باشند (Fouman, 2011). در همین راستا در مقایسه ارقام پگاه و اسپیدفید گزارش شده است که رقم پگاه در شرایط کاهش دوره‌های آبیاری می‌تواند عملکرد علوفه مناسبی تولید کند (Abdi and Habibi, 2017). به هر حال، مقاومت بالای سورگوم در برابر تنش‌های محیطی و تغییرات اقلیمی و هم‌چنین نقش

2014) و بهبود تحمل گوجه فرنگی به شوری نیز در اثر کاربرد فرم نانو کودها گزارش شده است (Almutairi *et al.*, 2016). در پژوهش دیگری گزارش شده است که نانو ذرات روی با بهبود تثبیت ساختار کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها و همچنین مشارکت در تعادل هورمونی، در شرایط خشکی سبب تداوم و افزایش فتوسنتز در گیاهان می‌گردد (Sun *et al.*, 2020). در بررسی اثرات محلول پاشی اکسید روی در دو اندازه نانو و غیر نانو بر عملکرد و اجزای عملکرد ماش تحت تأثیر کمبود آب گزارش شده است که محلول پاشی روی به صورت نانو ذرات نسبت به اکسید روی معمولی تأثیر بیشتری بر کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه ماش نشان داد (Shojaei and Makarian, 2015).

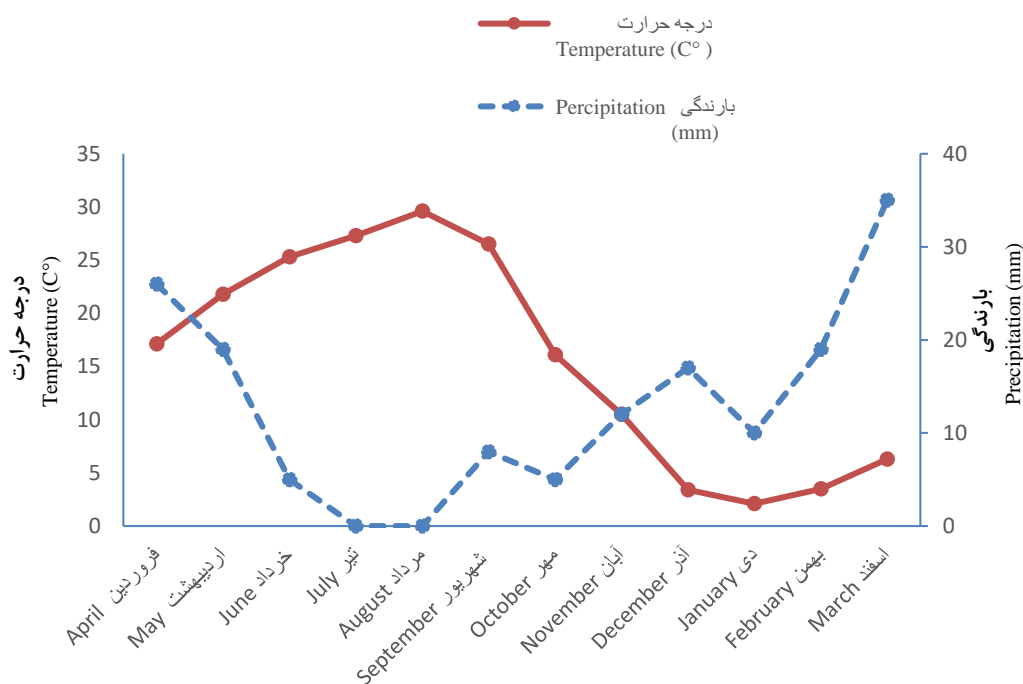
از آنجایی که ذرات نانو دارای ابعاد بسیار ریزی هستند لذا سطح ویژه بالایی دارند که این امر واکنش پذیری و تحرک بالاتری در گیاه ایجاد می‌کند و باعث می‌شود محلول کود روی با سرعت و همگنی بالاتر در گیاه توزیع شود، مجموعه این دلایل افزایش پارامترهای مؤثر در عملکرد را به دنبال دارد و به خصوص در شرایط وقوع تنش گیاه را در برابر آسیب‌های جدی محافظت می‌کند (Sun *et al.*, 2020; Nair *et al.*, 2010). بنابراین، با توجه به اثرات نامطلوب تنش خشکی ناشی از کم آبیاری بر گیاهان و لزوم ارائه راهکار برای کاهش اثرات این نوع تنش، این آزمایش با هدف بررسی اثر کاربرد کود روی به صورت معمولی و نانو ذره در کاهش اثرات مخرب تنش خشکی و بهبود عملکرد علوفه سه رقم سورگوم انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود اجرا شد. اطلاعات دما و بارندگی در طی دوره انجام آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است، بر این اساس بیشترین مقدار بارندگی در اسفند ماه اتفاق افتاد و کمترین میزان بارندگی نیز در تیر و مرداد اتفاق افتاد، همچنین اطلاعات هواشناسی نشان داد کمترین متوسط دما متعلق به دی‌ماه و بیشترین دمای متوسط مربوط به مردادماه بود.

در میان تعدیل کننده‌های مختلف برای کاهش اثرات مخرب تنش کم آبی، محلول پاشی عناصر معدنی مقاوم کننده گیاه به شرایط تنش، راهکاری منطقی در بهبود عملکرد و شرایط رشدی گیاه به شمار می‌آید (Hussein *et al.*, 2012). از عناصر غذایی دارای تأثیرات مثبت بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط تنش خشکی و شرایط معمولی، می‌توان به عنصر روی (Zn) اشاره کرد (Grzebisz *et al.*, 2008). روی نقش مهمی در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، RNA و DNA پلیمرز، دهیدروژناژ، پروتئیناز و بیوسنتز کلروفیل ایفا می‌کند (Abbasifar *et al.*, 2020; Vaghar *et al.*, 2020). نیاز گیاهان به روی اندک می‌باشد (۵-۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) اما در صورت کمبود روی در گیاه، تنش‌های فیزیولوژیکی ناشی از ناکارایی سیستم‌های متعدد آنزیمی و دیگر اعمال متابولیکی مرتبط با روی، رشد و عملکرد گیاه را کاهش خواهند داد (Baybordi, 2006). در همین راستا گزارش شده است که محلول پاشی روی با غلظت ۳ در هزار باعث افزایش معنی‌دار عملکرد برنج رقم چرام گردید (Chaker-*et al.*, 2009). در پژوهش دیگری گزارش شد که کاربرد اکسید روی معمولی باعث کاهش تأثیر منفی تنش خشکی و افزایش عملکرد و اجزای عملکرد در گیاه ذرت شد (Zhang *et al.*, 2021).

محققان در رابطه با تأمین عناصر غذایی گیاهان، بیان داشته‌اند که استفاده از کودهای نانو نسبت به حالت فرم معمول آن علاوه بر اینکه تأثیر بیشتری بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی دارد، آلودگی زیست‌محیطی کمتری نیز به همراه دارد (Prasad *et al.*, 2012). فرآورده‌های نانو شامل مخلوطی از ذره‌های با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که می‌توانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اولیه خود را حفظ کنند و از طرفی بدلیل داشتن سطح ویژه بیشتر بهتر جذب گیاهان می‌شوند (Dimkpa *et al.*, 2019). مطالعات متعددی نشان داده است که کاربرد کودها بصورت نانو از جنبه‌های مختلف بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر مثبت دارد. بعنوان مثال کاربرد اکسید روی به فرم نانو در ماش (Mahajan *et al.*, 2011) و گوجه‌فرنگی (Singh *et al.*, 2016) باعث بهبود رشد آن‌ها گردید. همچنین افزایش تحمل گندم و ذرت به تنش خشکی (Zaimenko *et al.*,)



شکل ۱- نمودار آمبروترمیک منطقه در سال انجام آزمایش

Figure 1- The ambrothermic diagram of the region in the year of the experiment

خشک شدند. سپس از هر نمونه ۱/۲ گرم در ارلن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و ۲۵ میلی‌لیتر از HNO₃ ۶۵ درصد به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها بعد از گرما دادن به مدت ۲۴ ساعت در اسید قرار داده شدند. هضم با ظروف در باز در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت تا زمانی که محتوای مایع ظروف بخار و تقریباً خشک شد. سپس ۵ میلی‌لیتر از پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد برای تکمیل هضم به ارلن‌ها اضافه شد و مجدداً تا بخار شدن مایع حرارت دید. سپس دیواره ارلن‌ها با آب دیونیزه شسته شد و مخلوط تا جوشیدن حرارت دید. محتوای ظروف بعد از خنک شدن به ظروف استاندارد ۲۵ میلی‌لیتری منتقل و با آب دیونیزه به حجم رسانده شد. سپس برای اندازه‌گیری میزان روی از دستگاه جذب اتمی از Perkin-Elmer مدل 2380 استفاده شد (Sekabira et al., 2011). در این آزمایش صفات رنگی‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید) با روش آرنون (Arnon, 1949) و پرولین (Bates et al., 1973) نیز اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها نیز براساس آزمون LSD در سطح پنج درصد انجام شد. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

آزمایش به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل تیمار کم آبیاری: در دو سطح دور آبیاری ۱۰ و ۲۰ روز که در پلات‌های اصلی قرار گرفت و ترکیبی از فاکتورهای رقم سورگوم در سه سطح محلی ارسک، اسپیدفید و پگاه و محلول پاشی روی در سه سطح عدم کاربرد، کاربرد روی به دو فرم معمولی و نانوذره در پلات‌های فرعی قرار گرفتند. میزان روی بکار رفته به هر دو صورت معمولی و نانو ذره به میزان ۲ در هزار بود. در مجموع ۱۸ تیمار و ۵۴ کرت آزمایشی هر کدام به مساحت ۱۲ متر مربع برای آزمایش در نظر گرفته شد. در این آزمایش به منظور اندازه‌گیری عملکرد علوفه تر و خشک (عملکرد بیولوژیک) در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک از هر کرت دو متر مربع بوته‌های سورگوم برداشت شد و پس از انتقال به آزمایشگاه و تعیین وزن تر، به مدت ۷۲ ساعت در آن با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس با ترازوی ۰/۰۱ گرم توزین شد و به عنوان عملکرد علوفه خشک ثبت شد. برای اندازه‌گیری غلظت روی گیاهان به قطعات کوچک تقسیم شده و دو مرتبه با آب دیونیزه شسته شدند، سپس نمونه‌ها در کاغذهای آلومینیومی پیچیده شده و برای ۲۴ ساعت در آن

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil of experimental location

نوع خاک Soil type	شن Sand (%)	لای Loam (%)	رس Clay (%)	نیتروژن Nitrogen (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	پتاسیم Potassium (mg.kg ⁻¹)	فسفر Phosphorus (mg.kg ⁻¹)	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	اسیدیته pH
لومی رسی Clay Loam	20.1	49.2	30.7	0.105	0.59	181.4	14.4	1.34	7.79

می‌شود (Gurmani et al., 2015).

نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری از نظر میزان کلروفیل *a* در بین رقم‌های اسپیدفید و محلی وجود نداشت اما میزان کلروفیل *a* در این ارقام به طور معنی‌داری از رقم پگاه بیشتر بود (جدول ۴). در همین راستا گزارش شده است که بین ارقام مختلف سورگوم از نظر میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و ارقامی که دارای رنگدانه‌های فتوسنتزی بیشتری هستند در نهایت عملکرد بیشتری نیز دارند (Kazemini and Alinia, 2017).

کلروفیل *b*

نتایج نشان داد که اثر دور آبیاری در سطح یک درصد، روی، رقم و اثر متقابل دور آبیاری و روی در سطح ۵ درصد بر میزان کلروفیل *b* معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل کاربرد روی و دور آبیاری (شکل ۳) نشان داد که کاربرد روی به فرم نانو و معمولی در شرایط تنش کم‌آبیاری باعث افزایش در محتوای کلروفیل *b* برگ سورگوم بترتیب به میزان ۲۵ و ۲۷ درصد نسبت به شاهد گردید. پژوهشگران بیان کرده‌اند روی در متابولیسم کربوهیدرات‌ها در گیاهان دخالت دارد، فعالیت آنزیم کربنیک آنهیدراز به سرعت در اثر کمبود روی، کاهش می‌یابد، کربنیک آنهیدراز در سیتوپلاسم و کلروپلاست تجمع می‌یابد و واکنش تبدیل CO₂ به بیکربنات و بالعکس را کاتالیز می‌کند که به فراهم شدن CO₂ برای فتوسنتز کمک می‌نماید. در گیاهانی که کمبود روی دارند ساخته شدن پروتئین کاهش می‌یابد و انباشته شدن اسیدهای آمینه در این گیاهان نشان دهنده اهمیت عنصر روی در سنتز پروتئین است که باعث کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی به خصوص کلروفیل‌ها می‌شود (Ebrahimian and Bybordi, 2014). نتایج آزمایش حاضر نیز نشان داد با کاربرد روی میزان

نتایج و بحث

کلروفیل *a*

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر دور آبیاری (در سطح یک درصد)، روی، رقم و اثر متقابل دور آبیاری و روی (در سطح پنج درصد) بر صفات کلروفیل *a* معنی‌دار شد، سایر اثرات متقابل بر صفت مذکور تأثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دور آبیاری و روی بر صفت کلروفیل *a* نشان داد (شکل ۲) که در سطوح مختلف تیمارهای روی، افزایش دور آبیاری سبب کاهش معنی‌دار مقدار کلروفیل *a* گردید که این امر می‌تواند یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش عملکرد ماده خشک و عملکرد دانه در سورگوم باشد، زیرا طبق نظر پژوهش‌گران کلروفیل‌ها اصلی‌ترین اجزای فتوسنتز گیاه هستند و کاهش در آن‌ها یا از بین رفتن آن‌ها می‌تواند به شدت باعث کاهش در تولید ماده خشک شود و در نهایت عملکرد دانه را کاهش دهد (Gurmani et al., 2015).

نتایج نشان داد که کاربرد فرم نانو و معمولی اکسیدروی در دور آبیاری ۲۰ روز باعث افزایش در مقدار کلروفیل *a* نسبت به شاهد گردید، بطوری‌که مقدار کلروفیل *a* در دور آبیاری ۲۰ روز با کاربرد فرم معمولی و نانو روی به ترتیب به میزان ۳۵/۸ و ۴۶/۲ درصد نسبت به شاهد در همین شرایط افزایش نشان داد (شکل ۲). هم‌چنین بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیشترین میزان برای کلروفیل *a* در شرایط آبیاری ۱۰ و ۲۰ روز در هنگام کاربرد نانو روی مشاهده شد که این امر نشان‌دهنده مطلوب‌تر بودن شکل نانو روی نسبت به فرم معمولی آن می‌باشد. عنصر روی دارای نقش مهمی در تعداد زیادی از واکنش‌های متابولیکی می‌باشد، عنصر روی، برای چندین آنزیم مانند آنهیدرات دهیدروژناز، اکسیداز و پراکسیداز به عنوان کوفاکتور عمل می‌کند و نیز از کلروپلاست‌ها محافظت می‌کند که این عمل باعث کاهش در تخریب کلروفیل‌ها طی تنش‌های محیطی

فتوسنتزی توسط محققین بسیاری گزارش شده است (Zengin, 2016; Adaikumari *et al.*, 2006). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده رقم بر کلروفیل *b* نیز نشان داد بیشترین مقدار برای کلروفیل *b* در رقم اسپد فید مشاهده شد، پس از رقم اسپد فید بیشترین مقدار کلروفیل *b* در رقم محلی بدست آمد و کمترین مقدار برای کلروفیل *b* در رقم پگاه مشاهده شد (جدول ۴).

کلروفیل برگ در گیاه سورگوم افزایش پیدا می کند. همچنین بیان شده است عنصر روی از طریق محافظت از گروه سولفیدریل باعث سنتز کلروفیل می گردد، پورفووبیلینوژن پیش ماده کلروفیل می باشد که برای تشکیل این ماده عناصر منیزیم و روی مورد نیاز است، در حضور عنصر روی نهایتاً تشکیل و تکمیل کلروفیل تسهیل می گردد (Behtash *et al.*, 2010). تأثیر عنصر روی در افزایش غلظت پروتئین برگ و رنگیزه های

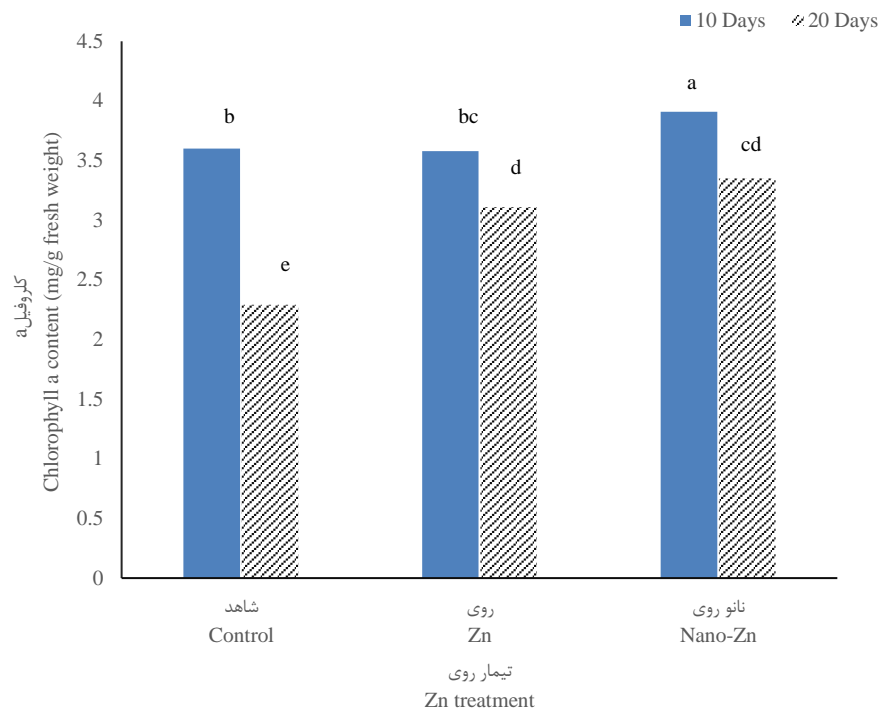
جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات فیزیولوژیک سورگوم تحت تأثیر تیمارهای آزمایش

Table 2- Analysis of variance (mean squares) of some physiological characteristics of sorghum affected by treatments

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	کلروفیل <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	کلروفیل <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>	کاروتنوئید Carotenoid	پرولین Proline
بلوک Replication	2	9 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.015 ^{ns}	0.71 ^{ns}
دور آبیاری Irrigation Interval	1	8.12 ^{**}	0.91 ^{**}	0.64 ^{**}	14.1 ^{**}
خطا Error	2	0.20	0.025	0.055	0.01
روی Zn	2	2.12 [*]	0.12 [*]	0.05 [*]	3.51 [*]
رقم Cultivar	2	0.89 [*]	0.14 [*]	0.038 [*]	0.87
دور آبیاری × روی Irrigation Interval × Zn	2	0.94 [*]	0.12 [*]	0.059 [*]	7.33 ^{**}
دور آبیاری × رقم Irrigation Interval × Cultivar	2	0.2 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.012 ^{ns}	0.12 ^{ns}
روی × رقم Zn × Cultivar	4	0.04 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.51 ^{ns}
دور آبیاری × روی × رقم Irrigation Interval × Cultivar × Zn	4	0.08 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.30 ^{ns}
خطا Error	32	0.23	0.040	0.013	1.36
(%) CV		14.1	15.4	14.2	10

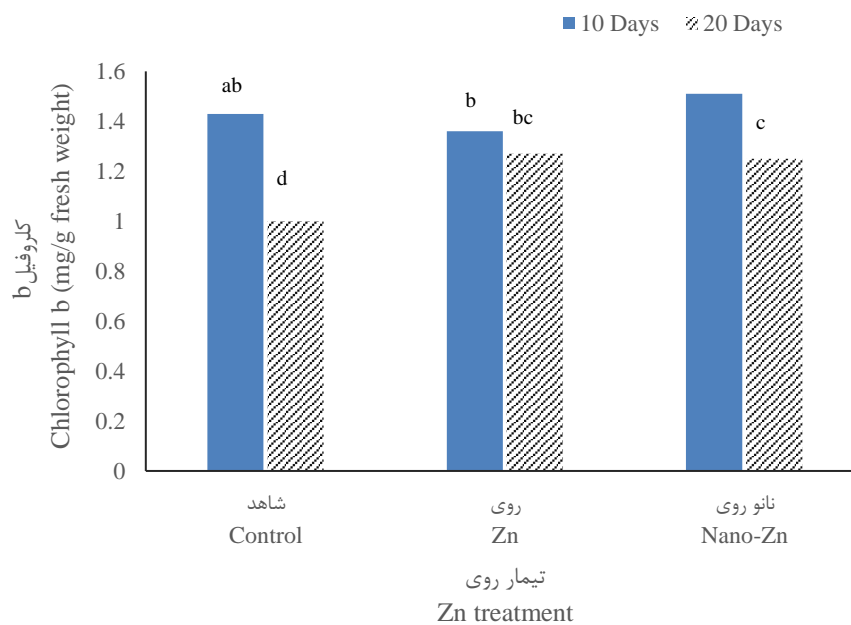
^{ns}، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشند.

ns, *, ** are non-significantly different and significantly different at 5 and 1 percent, respectively.



شکل ۲- اثر متقابل روی و دور آبیاری بر کلروفیل *a* در سورگوم

Figure 2- Interaction effect of zinc and irrigation interval on chlorophyll *a* in sorghum



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل روی و دور آبیاری بر کلروفیل *b* در سورگوم

Figure 3- Interaction effect of zinc and irrigation interval on chlorophyll *b* in sorghum

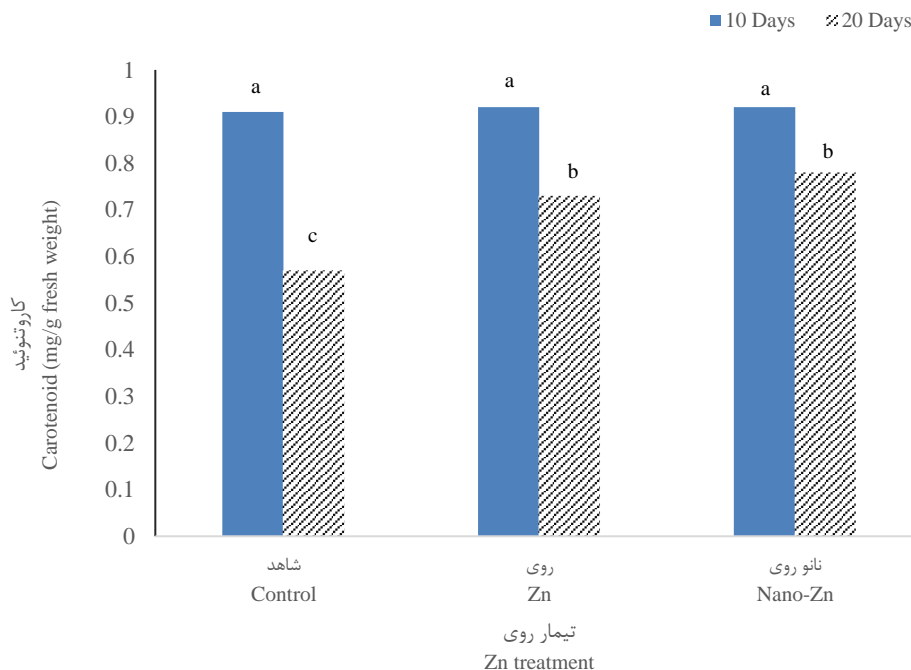
درصد بر میزان کاروتنوئید برگ معنی دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل روی و دور آبیاری بر محتوای کاروتنوئید برگ سورگوم نشان داد که در دور آبیاری ۱۰ روز

کاروتنوئید

براساس نتایج تجزیه واریانس اثر دور آبیاری در سطح یک درصد، روی، رقم و اثر متقابل دور آبیاری و روی در سطح ۵

پگاه مشاهده شد که نسبت به دو رقم دیگر به طور معنی داری کمتر بود (جدول ۴). ارقام مختلف سورگوم به دلیل سیستم ریشه‌ای متفاوت می‌توانند مقادیر متفاوتی از عناصر غذایی را از خاک جذب کرده و به همین خاطر محتوای کلروفیل‌ها و سایر رنگیزه‌ها در ارقام مختلف سورگوم متفاوت است (Mehraban *et al.*, 2012). در همین راستا نتایج ما نیز نشان داد که ارقام مختلف سورگوم از نظر میزان کلروفیل *a*، کلروفیل *b* و رنگیزه‌های فتوسنتزی دارای اختلاف معنی دار می‌باشند.

کاربرد روی اختلاف معنی داری با شاهد نشان نداد، اما در شرایط کم آبیاری با کاربرد روی بصورت معمولی و نانو، میزان کاروتنوئید برگ بترتیب به میزان ۲۸ و ۳۶/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۴). مقایسه میانگین اثر ساده رقم بر میزان کاروتنوئید نشان داد بیشترین مقدار برای کاروتنوئید در رقم محلی مشاهده شد که به طور معنی داری از دو رقم دیگر بیشتر بود، پس از رقم محلی بیشترین مقدار کاروتنوئید در رقم اسپیدفید مشاهده شد و کمترین مقدار برای کاروتنوئید در رقم



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل روی و دور آبیاری بر کاروتنوئید برگ سورگوم

Figure 4- Interaction effect of Zinc and irrigation interval on leaf carotenoid of sorghum

تولید کلروفیل، افزایش انرژی مصرفی گیاه جهت بالا بردن غلظت شیره سلولی، تغییر در مسیرهای تنفسی و فعال شدن مسیر پنتوز فسفات و یا افزایش حجم ریشه باشد (Serival *et al.*, 2001). در پژوهشی کاربرد نانو اکسید روی در سیب زمینی از طریق کمک به توسعه کلروپلاست‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی بهبود رشد این گیاه را در شرایط تنش خشکی به همراه داشت (Al-Selwey *et al.*, 2023). همین پژوهشگران بیان کردند که تنش ناشی از کمبود آب باعث تولید اکسیژن فعال شده و کلروپلاست‌ها را تخریب می‌نماید و در نهایت فعالیت فتوسنتزی و رنگدانه‌های مختلف گیاهی را کاهش می‌دهد، اما افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی که با

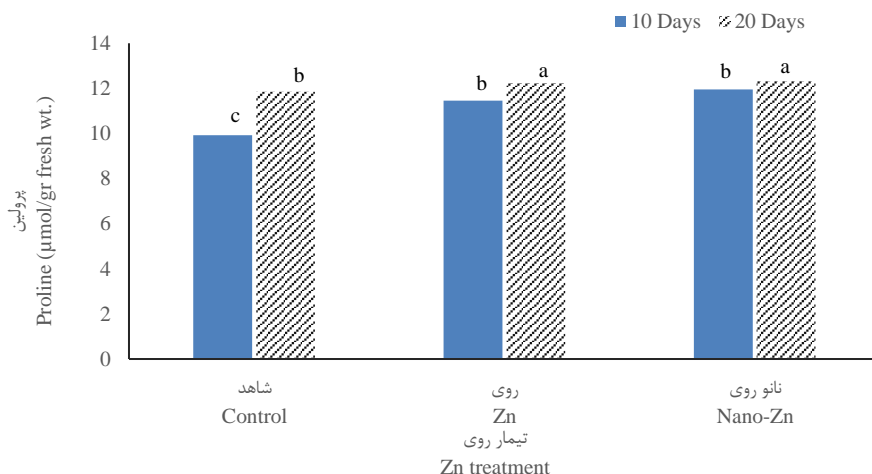
بر اساس نظر پژوهشگران کمبود آب یک تنش اکسیداسیونی به شمار می‌رود چرا که باعث تولید اکسیژن فعال (ROS) در گیاه مخصوصاً در طی فتوسنتز می‌گردد (Goodman and Newton, 2005). در پژوهشی روی گیاه دارویی زیره سبز مشاهده شد که محلول پاشی آهن و روی توأم با تنش خشکی باعث افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، گاپاکول پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز و آسکوربات پراکسیداز و رنگیزه‌های فتوسنتزی شد، که با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر مطابقت دارد (Peyvandi *et al.*, 2015). به هر حال گزارش شده است که کاهش عملکرد گیاه در شرایط تنش خشکی می‌تواند به دلیل کاهش سطوح فتوسنتز کننده، کاهش

پرولین در تیمار ۱۰ روز آبیاری و عدم کاربرد روی مشاهده شد که برابر ۹/۹۲ میکرومول بر گرم بافت تر بود (شکل ۵). در پژوهشی افزایش ۳۸/۷ درصدی پرولین تحت تأثیر تنش خشکی در سیب زمینی گزارش شد. در همین پژوهش کاربرد ۱۰۰ پی پی ام از فرم نانو اکسید روی سبب افزایش ۱۱/۷۵ درصدی پرولین در سیب زمینی گردید (Al-Selwey *et al.*, 2023). افزایش محتوای پرولین برگ به عنوان شاخص تنش‌های محیطی پذیرفته شده است، عناصر سنگین منجر به تجمع پرولین در برگ می‌شوند. گزارش شده است که تجمع پرولین در بافت‌های گیاهی به علت کاهش تنزل پرولین، افزایش بیوسنتز پرولین، کاهش سنتز پروتئین یا کاربرد پرولین و هیدرولیز پروتئین‌ها می‌باشد، که در شرایط تنش‌های محیطی به خصوص خشکی و شوری باعث تنظیم اسمزی سلول می‌شود (Zengin, 2016). اثرات تنظیم کننده اسمزی پرولین در توازن آب و تحمل خشکی در گیاهان زراعی مختلف و افزایش محتوی نسبی آب با افزایش پرولین در تحقیقات مختلف نشان داده شده است (Heidary and Moaveni, 2009).

کاربرد نانو اکسید روی حاصل می‌گردد، اثرات تنش کمبود آب را بهبود می‌بخشد.

پرولین

نتایج نشان داد اثر آبیاری و اثر متقابل آبیاری و روی در سطح یک درصد و اثر ساده روی در سطح پنج درصد بر میزان پرولین برگ معنی‌دار بود. سایر اثرات ساده و متقابل تأثیر معنی‌داری بر میزان پرولین نشان ندادند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل کم‌آبیاری و روی، کاربرد روی به فرم نانو و معمولی بترتیب سبب افزایش ۳/۸۷ و ۳/۲۰ درصدی پرولین در شرایط تنش کم‌آبیاری گردید (شکل ۵)، در واقع کاربرد روی در شرایط تنش باعث تولید بیشتر پرولین که یکی از مهم‌ترین اسمولیت‌ها و فاکتورهای مقاومت به تنش می‌باشد، با تولید بیشتر پرولین، گیاه بیشتر می‌تواند در برابر خشکی مقاومت کند. بیشترین مقدار پرولین در تیمار ۲۰ روز آبیاری و کاربرد نانو روی مشاهده شد (۱۲/۳۲ میکرومول بر گرم بافت تر) که البته با کاربرد فرم معمولی (روی) آن در همین دور آبیاری از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل روی و دور آبیاری بر پرولین برگ

Figure 5- Interaction effect of Zinc and irrigation interval on leaf proline of sorghum

افزایش معنی‌دار ۶/۸ و ۱۳/۵ درصدی پروتئین برگ نسبت به شاهد شد، اما بین تیمار روی و نانو روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۶). تأثیر عنصر روی در افزایش غلظت پروتئین برگ و دانه گیاهان زراعی توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Akinci *et al.*, 2008). گزارش شده است

پروتئین برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده دور آبیاری و روی در سطح یک درصد بر پروتئین برگ معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر روی بر پروتئین برگ نشان داد که کاربرد روی چه به فرم معمولی و به صورت نانو ذره باعث

کرد (نتایج نشان داده نشده است). پژوهشگران بیان کرده‌اند که کاهش محتوای نیتروژن در برگ گیاهان با افزایش تنش خشکی به دلیل کاهش جذب عناصر غذایی از خاک می‌باشد (Babaeian *et al.*, 2010). به همین دلیل می‌توان گفت که احتمالاً کاهش پروتئین متاثر از کاهش جذب نیتروژن در شرایط تنش کم آبیاری باشد.

که افزایش روی در محیط ریشه و جذب آن سبب بهبود در جذب نیتروژن شده و میزان فتوسنتز را افزایش داده و از این طریق باعث افزایش درصد پروتئین گیاه می‌شود (Babaeian *et al.*, 2010). نتایج مقایسه میانگین اثر دور آبیاری بر محتوای پروتئین برگ سورگوم نشان داد که با افزایش در دور آبیاری میزان پروتئین برگ در گیاه سورگوم ۱۳/۹ درصد کاهش پیدا

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی صفات کمی و کیفی سورگوم تحت تأثیر تیمارهای آزمایش

Table 3- Analysis of variance (mean squares) of some quantities and qualitative traits of sorghum affected by treatments					
منابع تغییر	درجه آزادی	پروتئین برگ	محتوای روی برگ	عملکرد علوفه تر	عملکرد علوفه خشک
S.O.V	df	Protein	Leaf Zn content	Fresh forage yield	Dry forage yield
بلوک	2	1.68 ^{ns}	12.54 ^{ns}	17.2 ^{ns}	4.7 ^{ns}
Replication					
دور آبیاری	1	34.88 ^{**}	122.22 ^{**}	4214 ^{**}	156.7 ^{**}
Irrigation Interval					
خطا	2	0.78	1.91	95.5	1.15
Error					
روی	2	13.26 ^{**}	435.55 ^{**}	1027 ^{**}	41.6 ^{**}
Zn					
رقم	2	4.69 ^{ns}	10.32 ^{ns}	584 ^{**}	19.1 [*]
Cultivar					
دور آبیاری × روی	2	4.28 ^{ns}	9.20 ^{ns}	9494 [*]	15.6 [*]
Irrigation Interval × Zn					
دور آبیاری × رقم	2	0.77 ^{ns}	8.87 ^{ns}	238.7 ^{ns}	10.2 ^{ns}
Irrigation Interval × Cultivar					
روی × رقم	4	0.26 ^{ns}	8.80 ^{ns}	11.6 ^{ns}	0.70 ^{ns}
Zn × Cultivar					
دور آبیاری × روی × رقم	4	0.34 ^{ns}	4.85 ^{ns}	13.5 ^{ns}	0.38 ^{ns}
Irrigation Interval × Cultivar × Zn					
خطا	32	2.45	6.34	107.3	15.15
Error					
(%) CV		19.5	15	12.2	13.7

^{ns}, *, ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

^{ns}, *, ** are non-significantly different and significantly different at 5 and 1 percent, respectively

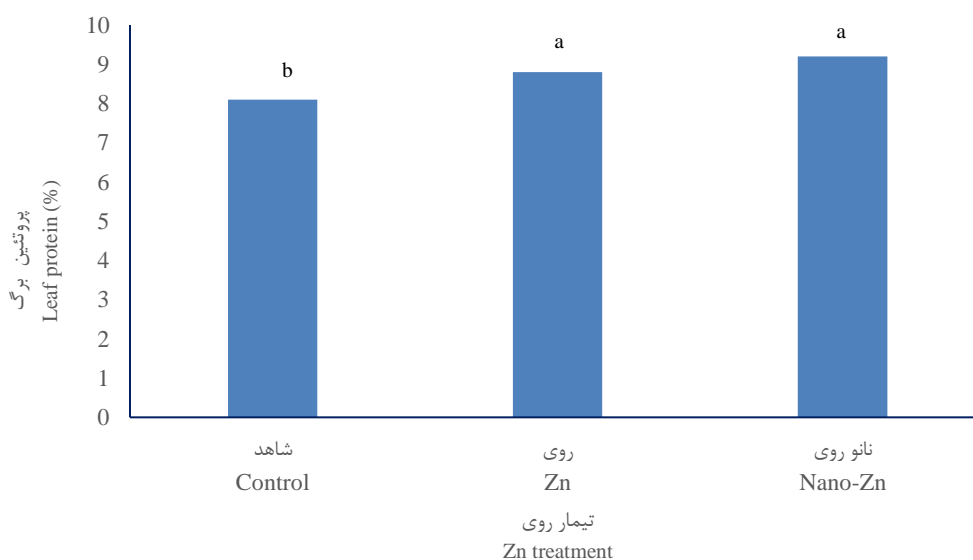
میانگین کاربرد روی باعث افزایش معنی دار در محتوای روی برگ شد. به طوری که محتوای روی برگ در تیمارهای کاربرد روی به صورت نانو، فرم معمولی روی و عدم کاربرد روی (شاهد) به ترتیب برابر ۲۰/۱۱، ۱۹/۶۱ و ۱۱/۱۴ پی پی ام بود (شکل ۷). هم‌چنین نتایج این آزمایش نشان داد دور آبیاری ۲۰ روز

محتوای روی برگ

بر اساس نتایج تجزیه واریانس محتوای روی در برگ تنها تحت تأثیر دور آبیاری (در سطح یک درصد) و روی (در سطح یک درصد) قرار گرفت و سایر اثرات ساده و متقابل بر میزان روی در برگ معنی دار نبودند (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه

تداخل مکانیسم‌های جذب و تخلیه همراه با کاهش میزان تعرق، باعث کاهش جذب عناصر غذایی از جمله روی می‌گردند (Baligar *et al.*, 2001). از این رو، کاهش آب قابل دسترس در شرایط خشکی باعث کاهش میزان روی و سایر عناصر غذایی قابل دسترس گیاه و در نهایت کاهش عملکرد و غلظت روی در گیاه می‌شود که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. میزان عناصر غذایی در ارقام مختلف سورگوم به طور معنی‌داری متفاوت می‌باشد که این تفاوت معنی‌دار به ساختار ریشه و میزان تارهای کشنده آن در ارقام مختلف بستگی دارد (Mehraban *et al.*, 2012).

باعث کاهش در میزان روی برگ سورگوم شد بطوری‌که از دور آبیاری ۱۰ روز به ۲۰ روز، میزان روی برگ ۴۱/۷ درصد کاهش پیدا کرد (نتایج نشان داده نشده است). گزارش شده است که مصرف سولفات روی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش عملکرد، درصد پروتئین دانه، جذب کل روی و غلظت روی دانه گندم می‌گردد (Savaghebi Firouzabadi *et al.*, 2003). بر اساس نظر پژوهشگران تنش خشکی می‌تواند جذب روی توسط گیاه را به روش‌های مختلف از جمله با کاهش رشد و توسعه ریشه و نیز کاهش میزان جابجایی روی در خاک تحت تأثیر قرار دهد (Samarah *et al.*, 2004). هم‌چنین در شرایط تنش خشکی،



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر ساده روی بر پروتئین برگ سورگوم

Figure 6- Mean comparison effect of zinc on leaf protein of sorghum

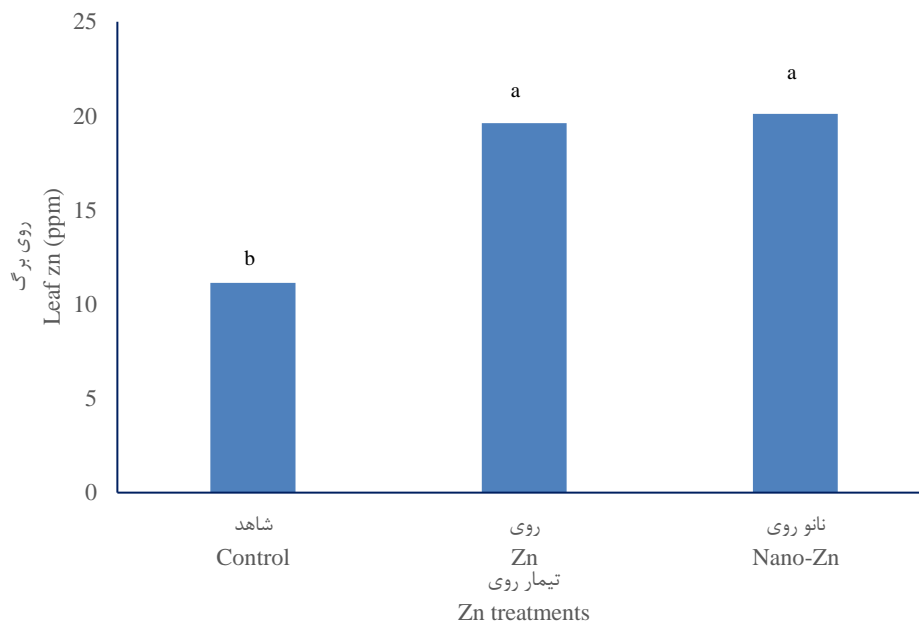
آبیاری و عدم کاربرد روی مشاهده شد که برابر ۶۱/۵ تن در هکتار بود. عملکرد علوفه تر با کاربرد نانو روی نسبت به حالت شاهد در دور آبیاری ۱۰ روز، ۶/۴۶ درصد و در دور آبیاری ۲۰ روز ۲۷/۳ درصد افزایش نشان داد (شکل ۸). در مطالعات مشابهی به تأثیر مثبت عنصر روی در افزایش بیوماس و عملکرد اشاره شده است و این افزایش در بیوماس در نتیجه بهبود فتوسنتز و افزایش کلروفیل برگ با کاربرد عنصر روی مخصوصاً در شرایط دیم گزارش شده است (Chen *et al.*, 2008). در آزمایش حاضر کاربرد عنصر روی در هر دو شرایط کم‌آبیاری و آبیاری معمول باعث افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی شد (شکل‌های ۲، ۳ و ۴) که این امر در نهایت باعث افزایش عملکرد

عملکرد علوفه تر

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر رقم، دور آبیاری و روی در سطح یک درصد و اثر متقابل دور آبیاری و روی در سطح پنج درصد بر عملکرد علوفه تر سورگوم معنی‌دار شد (جدول ۳). سایر اثرات متقابل اثر معنی‌داری بر عملکرد علوفه تر سورگوم نداشتند. بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل روی و دور آبیاری بر عملکرد علوفه تر سورگوم، با افزایش در دور آبیاری (از ۱۰ روز به ۲۰ روز) در تمام سطوح روی، عملکرد علوفه تر کاهش پیدا کرد (شکل ۸)، بیشترین عملکرد علوفه تر در تیمار ۱۰ روز آبیاری و کاربرد نانو روی مشاهده شد که برابر ۹۷/۴۸ تن در هکتار بود و کمترین عملکرد علوفه تر در تیمار ۲۰ روز

مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن اثرات منفی ناشی از مصرف بیش از حد کودها و کاهش تعداد دفعات کاربرد آن‌ها می‌شود (Liu and Lal, 2015; Al- Selwey *et al.*, 2023) که این مزایا علت بهتر بودن کودهای نانو نسبت به کودهای غیر نانو می‌باشد.

علوفه تر و خشک گردید (شکل‌های ۸ و ۹). در پژوهش دیگری گزارش شده است که کاربرد روی سبب افزایش معنی‌دار پتانسیل آب برگ، محتوای کلروفیل و سطح برگ ذرت از طریق بهبود رشد ریشه گردید (Zhang *et al.*, 2021). بر اساس نظر پژوهشگران استفاده از نانو کودها منجر به افزایش کارایی



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر روی بر محتوای روی برگ سورگوم

Figure 7- Mean comparison effect of zinc on leaf Zn content of sorghum

اثر روی و دور آبیاری در سطح یک درصد و اثر متقابل دور آبیاری و روی در سطح پنج درصد بر عملکرد علوفه خشک سورگوم معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل روی و دور آبیاری نشان داد که تنش ناشی از دور آبیاری ۲۰ روز در سطح شاهد روی سبب کاهش ۳۱/۴۹ درصدی عملکرد علوفه خشک سورگوم در مقایسه با دور آبیاری ۱۰ روز شد، اما کاربرد روی در تیمارهای دارای در هر دو دور آبیاری باعث افزایش عملکرد علوفه خشک نسبت به شاهد گردید (شکل ۹). کاربرد فرم نانو اکسید روی در دور آبیاری ۲۰ روز عملکرد علوفه خشک سورگوم را معادل تیمار شاهد عدم تنش آبیاری (دور آبیاری ۱۰ روز) افزایش داد. بیشترین عملکرد علوفه خشک در تیمار ۱۰ روز آبیاری و کاربرد فرم نانو روی و روی معمولی بدست آمد که به ترتیب برابر ۱۸/۸ و ۱۸/۲ تن در هکتار بود و کمترین عملکرد علوفه خشک (۱۲ تن در هکتار) در تیمار دور آبیاری ۲۰ روز و عدم کاربرد روی مشاهده شد

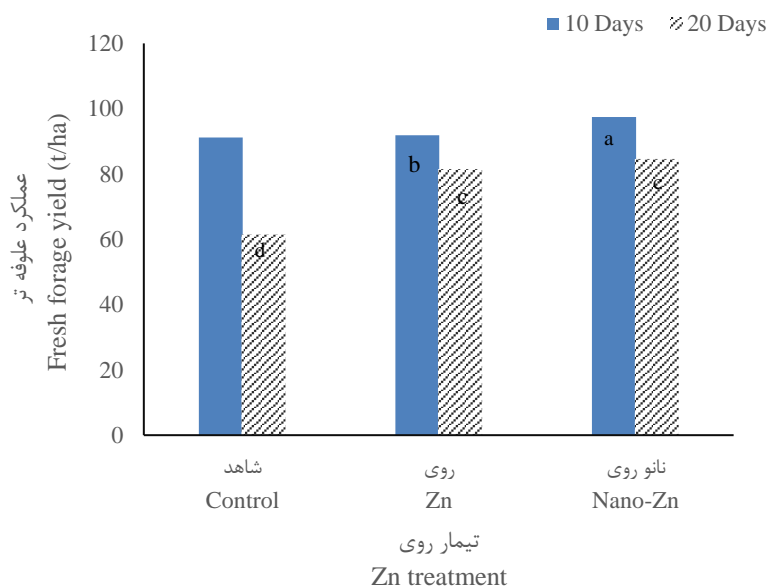
بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر رقم بر عملکرد علوفه تر سورگوم، رقم محلی ارسک به طور معنی‌داری دارای بیشترین عملکرد علوفه تر بود و کمترین مقدار برای عملکرد علوفه تر در رقم پگاه مشاهده شد که نسبت به دو رقم اسپیدفید و ارسک به طور معنی‌داری دارای عملکرد علوفه کمتری بود (جدول ۴). بطور مشابه با نتایج این پژوهش، گزارش شده است که بین عملکرد علوفه ارقام مختلف سورگوم اختلاف معنی‌دار وجود دارد، پژوهشگران دلیل این اختلاف معنی‌دار را هم به اثرات محیطی و هم به اثرات ژنتیکی ربط داده‌اند و گزارش کردند ارقامی که به شرایط سخت محیطی مقاوم باشند در شرایط تنش میزان عملکرد علوفه بیشتری به همراه خواهند داشت (Rafiee, 2018).

عملکرد علوفه خشک

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر رقم در سطح پنج درصد،

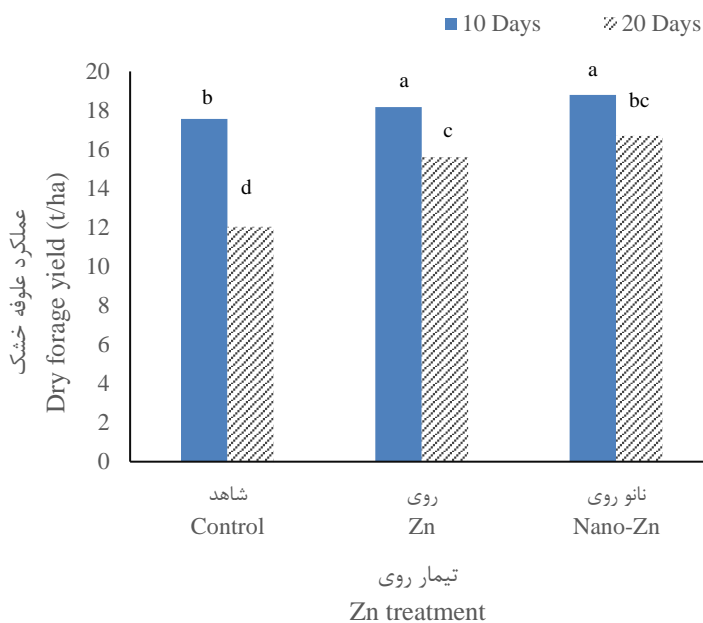
عملکرد می‌شود اما روی تا حدی می‌تواند این اثر منفی را جبران کرده و باعث افزایش در عملکرد علوفه خشک و تر سورگوم شود.

(شکل ۹). به عبارتی در شرایط تنش کم آبیاری کاربرد روی به فرم معمولی و نانو ذره بترتیب سبب افزایش ۲۹/۸۴ و ۳۸/۸۱ درصدی عملکرد علوفه خشک نسبت به شاهد دارای تنش گردید. بر این اساس می‌توان بیان کرد گرچه تنش باعث کاهش



شکل ۸- اثر متقابل روی و کم آبیاری بر عملکرد علوفه تر

Figure 8- Interaction effect of Zinc and irrigation interval on fresh forage yield of sorghum



شکل ۹- اثر متقابل روی و دور آبیاری بر عملکرد علوفه خشک سورگوم

Figure 9- Interaction effect of Zinc and irrigation interval on dry forage yield of sorghum

دلیل این امر را اینگونه بیان کردند که روی بعنوان فعال کننده آنزیم‌های مختلف در گیاه و سوبسترای رشد هورمون ایندول

سایر محققین نیز ادعان داشته‌اند که کاربرد سولفات روی باعث افزایش در عملکرد علوفه تر و خشک می‌شود، این پژوهشگران

متفاوت بود بطوری که بیشترین عملکرد علوفه خشک مربوط به رقم محلی ارسک بود و ارقام اسپیدفید و پگاه در رتبه‌های بعدی قرار داشتند (جدول ۴). با توجه به بررسی صفات مختلف از قبیل رنگدانه‌های فتوسنتزی و پرولین که در رقم محلی و اسپیدفید وضعیت بهتری داشت می‌توان نتیجه گرفت که بهبود فتوسنتز و بهبود کنترل اثرات تنش در رقم محلی توانست در نهایت منجر به افزایش عملکرد علوفه تر و خشک نیز گردد و بطور معنی‌داری از ارقام اسپیدفید و پگاه وضعیت بهتری پیدا کند. در تحقیقی اثر دور آبیاری بر عملکرد علوفه و عملکرد دانه ارقام سورگوم در منطقه میانه مورد بررسی قرار گرفت و گزارش شد که دور آبیاری اثر معنی‌داری بر عملکرد علوفه و دانه سورگوم دارد. عملکرد علوفه و دانه سورگوم در ارقام مختلف نیز به طور معنی‌داری متفاوت می‌باشد که این امر انتخاب رقم مناسب با توجه به هدف کاشت را مهم و ضروری می‌نماید (Nasari et al., 2011).

استیک اسید عمل می‌کند و سبب تولید ماده خشک زیادتر در گیاه سورگوم می‌شود (Eliaspour et al., 2019). در مطالعه اثر روی بر عملکرد گیاهان در شرایط کم آبی گزارش شده است که کمبود روی و خشکی باعث کاهش عملکرد گندم نان و دوروم شده و بین ژنوتیپ‌ها از لحاظ تحمل به تنش خشکی و کمبود روی تنوع وجود دارد، هم‌چنین در صورت عدم دسترسی گیاه به میزان کافی از روی، کارایی استفاده از آب به صورت معنی‌داری کاهش یافته و باعث افت عملکرد می‌شود (Bagci et al., 2007). محققین مختلف گزارش نموده‌اند که استفاده از نانو ذرات، پتانسیل تحمل به خشکی را در گیاهان مختلف از قبیل سویا (Vaghar et al., 2020) و ذرت افزایش می‌دهد (Klute and Dirksen, 2018). محققین دیگر نیز گزارش داده‌اند که کاربرد نانو اکسید روی از طریق افزایش کارایی مصرف آب عملکرد سیب زمینی را در شرایط کمبود آب افزایش داده است (Al-Selwey et al., 2023). نتایج نشان داد عملکرد علوفه خشک بین ارقام مختلف سورگوم

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر رقم بر برخی از صفات فیزیولوژیک و عملکرد علوفه سورگوم

Table 4- Mean comparison effect of sorghum cultivar on some physiological and forage yield of sorghum

ارقام سورگوم Sorghum cultivars	کلروفیل a Chlorophyll a (mg/g fresh w.)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg/g fresh w.)	کاروتنوئید Carotenoid (mg/g fresh w.)	عملکرد علوفه تر Fresh forage yield (t/ha)	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield (t/ha)
ارسک Eresk	3.437 ^a	1.327 ^b	0.840 ^a	88.500 ^a	17.156 ^a
اسپیدفید Speedfeed	3.435 ^a	1.384 ^a	0.816 ^b	87.404 ^b	16.985 ^b
پگاه Pegah	3.049 ^b	1.205 ^c	0.7522 ^c	78.135 ^c	15.291 ^c

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means of each column with common letters are not significantly different at 5% by LSD test.

رنگدانه‌های فتوسنتزی از قبیل کلروفیل a، b و کاروتنوئید، سبب تعدیل اثرات تنش و افزایش عملکرد علوفه تر و خشک سورگوم گردید. در بین ارقام مورد بررسی، رقم محلی ارسک، اسپیدفید و پگاه بترتیب از نظر صفات مورد بررسی و در نهایت عملکرد علوفه وضعیت بهتری داشتند. بنابراین استفاده از روی در برنامه‌های تغذیه‌ای مزارع سورگوم ضمن افزایش کیفیت علوفه می‌تواند باعث تعدیل اثرات سوء تنش خشکی بر رشد و عملکرد سورگوم شود.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج این پژوهش با افزایش دور آبیاری از ۱۰ به ۲۰ روز صفات مختلف سورگوم از قبیل کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، عملکرد علوفه تر و خشک سورگوم بطور معنی‌داری کاهش یافت. کاربرد اکسید روی به فرم نانو و معمولی آن محتوای روی برگ و درصد پروتئین سورگوم را بهبود بخشید. اما کاربرد اکسید روی به فرم نانو و غیر نانو در شرایط تنش کم آبیاری (دور آبیاری ۲۰ روز) از طریق افزایش پرولین و بهبود

References

- Abbasifar, A., Shahrabadi, F. and ValizadehKaji, B., 2020. Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. *Journal of Plant Nutrition*, 43, pp.1104–1118. [In Persian]. doi: **10.1080/01904167.2020.1724305**
- Abdi, M. and Habibi, M., 2017. Effect of drought stress on quantitative and qualitative traits of two forage sorghum cultivars in Jiroft region. *Agroecology Journal*, 13, pp.35-40. [In Persian]. doi: **10.22034/aej.2017.536835**
- Akinci, C., Doran, I., Yildirim, M. and Gul, I., 2008. Effects of different zinc doses on zinc and protein contents of barley. *Asian Journal of Chemistry*, 20, pp.2293-2301.
- Adaikumari, M., Khan, S., Pakrashi, S. and Mukherjee, A., 2006. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*. *Journal of Hazard Material*, 190(1), pp.613-621. doi: **10.1016/j.jhazmat.2011.03.095**
- Almutairi, Z.M., 2016. Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress. *Plant Omics Journal*, 9, pp.106–114.
- Al-Selwey, W.A., Alsadon, A.A., Ibrahim, A.A., Labis, J.P., Seleiman, M.F., 2023. Effects of zinc oxide and silicon dioxide nanoparticles on physiological, yield, and water use efficiency traits of potato grown under water deficit. *Plants*, 12, 218. doi: **10.3390/plants12010218**
- Ananda, G.K.S., Myrans, H., Norton, S.L., Gleadow, R., Furtado, A. and Henry, R.J., 2020. Wild Sorghum as a Promising Resource for Crop Improvement. *Frontier in Plant Science*, 11, 1108. doi: **10.3389/fpls.2020.01108**
- Babaeian, M., Heidari, M. and Ghanbari, A., 2010. Effect of water stress and foliar micronutrient application on physiological characteristics and nutrient uptake in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 12(4), pp.377-391. [In Persian].
- Bagci, S.A., Ekiz, H., Yilmaz, A. and Cakmak, I., 2007. Effects of zinc deficiency and drought on grain yield of field-grown wheat cultivars in Central Anatolia. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193(3), pp.198-206. doi: **10.1111/j.1439-037X.2007.00256.x**
- Baligar, V.C., Fageria, N.K. and He, Z.L., 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 32, pp.921-950. doi: **10.1081/css-100104098**
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, pp.205–207. doi: **10.1007/bf00018060**
- Baybordi, A., 2006. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Parivar Press. Pp.179-185. [In Persian]. doi: **10.1002/9780470960707.ch16**
- Behtash, F., Tabatabaei, S., Malakouti, M. and Sororaddin, M., 2010. Effect of zinc and cadmium on growth, chlorophyll content, photosynthesis, and cadmium concentration in red beet. *Iranian Journal of Soil Research*, 24(1), pp.31-41. [In Persian]. doi: **10.22092/ijsr.2010.126527**
- Chaker-alhosseini, M.H., Mohtashami, R. and Oleiaei, H.R., 2009. Effects of rate, source, and method of zinc fertilizer application on quantitative and qualitative characteristics of Rice (Choram 1). *Journal of Research in*

- Agricultural Science*, 5, pp.33-43. [In Persian].
- Chen, W., Yang, X., He, Z., Feng, Y. and Hu, F., 2008. Differential changes in photosynthetic capacity, 77 K chlorophyll fluorescence and chloroplast ultrastructure between Zn-efficient and Zn-inefficient rice genotypes (*Oryza sativa*) under low zinc stress. *Physiologia Plantarum*, 132(1), pp.89-101. doi: 10.1111/j.1399-3054.2007.00992.x
- Dimkpa, C.O., Singh, U., Bindraban, P.S., Elmer, W.H., Gardea-Torresdey, J.L. and White, J.C., 2019. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *The Science of the Total Environment*, 688, pp.926–934. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.392
- Ebrahimian, E. and Bybordi, A., 2014. Exogenous silicium and zinc increase antioxidant enzyme activity and alleviate salt stress in leaves of sunflower. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9(1), pp.422-427. [In Persian].
- Eliaspour, S. Seyed Sharifi, R. and Shirkhani, A., 2019. Evaluation of yield and yield components of forage sorghum using zinc sulfate and nitrogen fertilizer. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 29(4), pp.145-158. [In Persian].
- Fouman, A., 2011. Evaluation of different forage sorghum cultivars [*sorghum bicolor* (l.) moench] through an assessment of morphological, quantitative & qualitative yield traits. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 41(4), pp.833-840. [In Persian]. doi: 20.1001.1.20084811.1389.41.4.19.4
- Goodman, B.A. and Newton, A.C., 2005. Effects of drought stress and its sudden relief on free radical processes in barley. *Journal of Science Food Agriculture*, 85, pp.47-53. doi: 10.1002/jsfa.1938
- Grzebisz, W., Wrońska, M., Diatta, J.B. and Dullin, P., 2008. Effect of zinc foliar application at early stages of maize growth on patterns of nutrients and dry matter accumulation by the canopy. Part I. Zinc uptake patterns and its redistribution among maize organs. *Journal of Elementology*, 13, pp. 17-28.
- Gurmani, A.R., Din, J.U., Khan, S.U., Andaleep, R., Waseem, K., Khan, A. and Hadyat-Ullah, A., 2015. Soil application of zinc improves growth and yield of tomato. *International Journal Agricultural Biology*, 14, pp.91–96.
- Heidary, Y. and Moaveni, P., 2009. Study of drought stress on accumulation and proline among aba in different genotypes forage corn. *Research Journal of Biological Sciences*, 4, pp.1121-1124. [In Persian].
- Hussein, M.M., El-Faham, S.Y. and Alva, A.K., 2012. Pepper plants growth, yield, photosynthetic pigments, and total phenols as affected by foliar application of potassium under different salinity irrigation water. *Agricultural Sciences*, 3, pp.241-248. doi: 10.4236/as.2012.32028
- Kazemeini, S.A. and Alinia M., 2017. Effect of salinity stress on growth, yield and some physiological traits of forage sorghum cultivars. *Journal of Crop Production and Processing*, 7(2), pp.19-31. [In Persian].
- Klute, A. and Dirksen, C., 2018. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. Agronomy Monograph No. 9, ASA, Madison, pp.687-734. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28
- Liu, R. and Lal, R., 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, pp.131–139.

doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.104

Mahajan, P., Dhoke, S. and Khanna, A., 2011. Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *Journal of Nanotechnology*, 696535.

doi: 10.1155/2011/696535

Mehraban, A., Moussavi Nik, S.M. and Tavassoli, A., 2012. The effect of vesicular arbuscular mycorrhizal (vam) on yield and yield components of three sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars. *Journal of Crop Ecophysiology (Agriculture science)*, 6(3 (23)), pp.265-277. [In Persian].

Nair, R., Hanna Varghese, S., Nair, B., Maekawa, G.T., Yoshida, Y. and Sakthi kumar, D., 2010. Nano-particulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179, pp.154-163. **doi: 10.1016/j.plantsci.2010.04.012**

Naseri, P., Faramarzi, A., Khorshidi Benam, M.B. and Shahrokhi, Sh., 2011. Effect of irrigation intervals on yield and yield components of sorghum bicolor cultivars in Miyaneh region, iran. *Journal Of Crop Ecophysiology (Agriculture Science)*, 5(19), pp.93-103. Sid. [In Persian].

Peyvandi, M., Parande, H. and Mirza, M., 2015. Comparison of nano Fe chelate with Fe chelate effect on quantitative and qualitative essential oil of *Ocimum basilicum*. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 31(2), pp.185-193. [In Persian]. **doi: 10.22092/ijmapr.2015.101458**

Prasad, T.N.V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T.S., Sajanalal, P.R. and Pradeep, T., 2012. Effect of nanoscales zinc oxide on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35, pp.905-927. **doi: 10.1080/01904167.2012.663443**

Rafiee M., 2018. Effect of sowing time on growth and yield of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.) cultivars in second cropping in temperate region of Lorestan province. *Iranian Journal of Crop Science*, 20, pp.180-192. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.15625540.1397.20.3.1.8**

Samarah, N., Mullen, R. and Cianzio, S., 2004. Size distribution and mineral nutrients of soybean seeds in response to drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27, pp.835-815. **doi: 10.1081/pln-120030673**

Sarshad, A., Talei, D., Torabi, M., Rafei, F. and Nejatkhah, P., 2021. Morphological and biochemical responses of *Sorghum bicolor* (L.) Moench under drought stress. *Springer Nature Applied Science*, 3(81), pp.1-13. **doi: 10.1007/s42452-020-03977-4**

Savaghebi Firouzabadi, GH.R., Malakouti, M.J. and Moez Ardalani, M., 2003. Effects of zinc sulfate application as well as seed zinc concentration on responses of wheat. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 34, pp.471-482. [In Persian]. **doi: 10.3390/agronomy12030734**

Sekabira, K., Oryem- Origa, H., Mutumba, G., Kakudidi, E. and Basamba, T.A., 2011. Heavy metal phytoremediation by (*Commelina benghalensis* L) and (*Cynodon dactylon* L) growing in Urban stream sediments. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 3(8), pp.133-142.

Serival, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. and Demuth, S., 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21, pp.317-333. **doi: 10.1002/joc.619**

Shojaei, H. and Makarian, H., 2015. The effect of nano and non-nano zinc oxide particles foliar application on yield and yield components of mungbean (*Vigna radiata*) under drought Stress. *Iranian Journal of Field Crop*

- Research*, 12, pp.727-737. [In Persian]. doi: **10.22067/gsc.v12i4.24603**
- Singh, A., Singh, N., Hussain, I., Singh, H., Yadav, V. and Singh, S., 2016. Green synthesis of nano zinc oxide and evaluation of its impact on germination and metabolic activity of *Solanum lycopersicum*. *Journal of Biotechnology*, 233, pp.84–94. doi: **10.1016/j.jbiotec.2016.07.010**
- Sun, L., Song, F., Guo, J., Zhu, X., Liu, S. and Liu, F., 2020. Nano-ZnO-induced drought tolerance is associated with melatonin syn-thesis and metabolism in maize. *International Journal of Molecular Science*, 21, 782. doi: **10.3390/ijms21030782**
- Vaghar, M.S., Sayfzadeh, S., Zakerin, H.R., Kobraee, S. and Valadabadi, S.A., 2020. Foliar application of iron, zinc, and manganese nanochelates improves physiological indicators and soybean yield under water deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43, pp.2740–2756. doi: **10.1080/01904167.2020.1793180**
- Zaimenko, N.V., Didyk, N.P., Dzyuba, O.I., Zakrasov, O.V., Rositska, N.V. and Viter, A.V., 2014. Enhancement of drought resistance in wheat and corn by nanoparticles of natural mineral analcite. *Ecologia Balkanica*, 6, pp.1–10.
- Zengin, K.F., 2016. The effects of Co²⁺ and Zn²⁺ on the contents of protein, abscisic acid, proline and chlorophyll in bean (*Phaseolus vulgaris* cv. *Strike*) seedlings. *Journal of Environmental Biology*, 27, pp.441-448.
- Zhang, G., Shen, D., Ming, B., Xie, R., Jin, X., Liu, C., Hou, P., Xue, J., Chen, J., Zhang, W., Liu, W., Wang, K. and Li, S., 2019. Using irrigation intervals to optimize water-use efficiency and maize yield in Xinjiang, northwest China. *The Crop Journal*, 7(3), pp.322-334. doi: **10.1016/j.cj.2018.10.008**
- Zhang, L., Yan, M., Ren, Y., Chen, Y. and Zhang, S., 2021. Zinc regulates the hydraulic response of maize root under water stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, pp.123-134. doi: **10.1016/j.plaphy.2020.12.014**

The effect of foliar application of nano and non-nano zinc oxide particles on some physiological traits and forage yield of sorghum under water deficit stress

Masome Khaleghdoost¹, Hassan Makarian^{2*}, Hamid Abbasdokht², Mehdi Baradaran Firouzabadi²

¹ M.Sc Graduate of Agroecology, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Corresponding Author: h.makarian@yahoo.com

Received: 11 March 2023

Accepted: 20 April 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2024.390869.1332

Abstract

Introduction: Zinc (Zn) plays an important role in plant growth and tolerance to stress and increasing their yield, but it has been reported that zinc nanoparticles have a better role on improving the growth of plants under water stress conditions. One of the factors limiting the growth of sorghum forage plant is water stress. Studies have shown that zinc nanoparticles have a positive impact on plants response to water shortage conditions through improving photosynthesis and enzymatic activity. Therefore, this study was conducted to investigate the effect of foliar application of nanosized and non-nano zinc oxide on some physiological and forage yield of three sorghum (*Sorghum bicolor* L.) cultivars under water deficit condition.

Materials and Methods: This study was performed at the research farm of Shahrood University of Technology in the growing season of 2018-19. The experiment was arranged as split plot factorial based on randomized complete block design with three replications. Water deficit stress treatment in two levels of 10 and 20 days irrigation interval were assigned as main plots and sub plots were the combination of the two factors; sorghum cultivars at three levels: Eresk, Speedfeed and Pegah, and foliar application of zinc in three levels of control, micro and nano-particles forms at concentration of 2 gr l⁻¹. Foliage spraying of Zinc was performed before flowering stage of sorghum. Sampling and measuring of sorghum pigments, leaf protein, leaf zinc contents and proline were done at flowering stage. Wet and dry forage yield of sorghum was measured at the end of growing season on the 2 squares meter in each plot. All data collected were subjected of analysis of variance (ANOVA) using MSTATC software. Significant differences between means refer to the probability level of 0.05 by LSD test.

Results and Discussion: The results showed that by increasing the irrigation interval from 10 to 20 days, chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids, leaf protein, leaf zinc content, fresh and dry forage yield decreased significantly. The results indicated that the minimum fresh forage yield (61.48 ton/ha) and dry forage yield (12.03 ton/ha) was observed with non-application of zinc in irrigation interval of 20 days. Water deficit stress causes damage to photosynthesis pigments, stomatal conductance and finally the growth and yield of plants. The results showed that application of zinc in nano or conventional form causes a significant increase in chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, carotenoids, proline, leaf protein, zinc content, fresh and dry forage yield under stress conditions. The highest fresh and dry forage yield were observed at the rate of 97.4 and 18.8 ton.ha⁻¹ respectively in irrigation interval of 10 days treatment by application of ZnO nano particles. Also, the results showed that, foliar application of zinc in nano and conventional form increased fresh forage yield of sorghum by 37.58 and 32.49 percent compared with control in water deficit stress condition respectively. This can be due to the role of ZnO nano particles that can enhance the rate of photosynthesis by improving gas exchange, chlorophyll fluorescence, carbonic anhydrase activity, and enhanced proline content in plants. Results also showed that in the most of physiological and yield traits and forage yield the local Ersek cultivar was better significantly than Speed Feed and Pegah cultivars.

Conclusion: The foliar application of ZnO conventional and nano particles significantly mitigated water deficit stress and enhanced photosynthesis pigments, proline, leaf protein and zinc contents as well as improved the fresh and dry yield of sorghum.

Keywords: Nano fertilizers, Plant nutrition, Proline, Water stress