تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰
۳۷۵-۳۸۶
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2019.2645.1687

مقاله پژوهشی

بررسی اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر صفات کمی و کیفی کنجد (*Sesamum indicum* L)

زینب کرمیان حسن‌آبادی[۱]، حمیدرضا عیسوند[۲*]، ماشالله دانشور[۳]، امیدعلی اکبرپور[۳]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زراعت، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان
۲. دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان
۳. استادیار گروه دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۱۰

چکیده

به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر صفات کمی و کیفی کنجد، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده با سه تکرار در سال ۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا شد. عوامل مورد بررسی در آزمایش، شامل تنش خشکی به‌عنوان عامل اصلی در دو سطح عدم تنش (آبیاری تا ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش خشکی (آبیاری تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و محلول‌پاشی نانو اکسید آهن به‌عنوان عامل فرعی در پنج سطح عدم محلول‌پاشی (شاهد)، محلول‌پاشی با آب (۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار)، نانو اکسید آهن ۰/۰۵ درصد (۰/۵ کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار)، نانو اکسید آهن ۰/۱۰ درصد (یک کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار) و نانو اکسید آهن ۰/۱۵ درصد (۱/۵ کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار) بودند. نتایج نشان داد، تنش خشکی به‌جز محتوای پروتئین دانه، سایر صفات نظیر تعداد کپسول در بوته (۳۱/۵۵ درصد)، وزن هزار دانه (۱۸/۵۱ درصد)، عملکرد دانه (۲۶/۵۲ درصد)، عملکرد بیولوژیک (۹/۴۲ درصد)، شاخص برداشت (۳/۹۴ درصد)، محتوای روغن دانه (۱۰/۳۰ درصد)، عملکرد روغن دانه (۴۰/۴۷ درصد) و عملکرد پروتئین دانه (۲۴/۹۰ درصد) را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. این در حالی بود که کاربرد نانو اکسیدآهن صفات تعداد کپسول در بوته (۴۵/۰۲ درصد)، وزن هزار دانه (۱۹/۸۶ درصد)، عملکرد دانه (۳۷/۴۳ درصد)، عملکرد بیولوژیک (۲۲/۹۱ درصد)، شاخص برداشت (۳/۸۶ درصد)، محتوای روغن دانه (۶/۴۹ درصد)، عملکرد روغن دانه (۴۵/۷۰ درصد) و عملکرد پروتئین دانه (۴۰/۹۳ درصد) را تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. در بین سطوح مختلف محلول‌پاشی، نانو اکسید آهن ۰/۱۵ درصد بیشترین تأثیر را در افزایش صفات مورداندازه‌گیری نشان داد. به‌طورکلی، می‌توان از محلول‌پاشی نانو اکسید آهن به‌ویژه در غلظت ۰/۱۵ درصد به‌منظور کاهش اثرات زیان‌بار تنش خشکی و بهبود صفات کمی و کیفی کنجد در شهرستان خرم‌آباد بهره برد.

واژه‌های کلیدی: **تنش‌های محیطی، خصوصیات زراعی، دانه‌های روغنی، عناصر ریزمغذی**

مقدمه

دانه‌های روغنی پس از غلات، دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند (Ayobizadeh et al., 2017). کنجد یکی از دانه‌های روغنی است که در بیشتر مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان کشت می‌شود و احتمالاً قدیمی‌ترین دانه روغنی است که بشر آن را شناخته و مصرف نموده است (Rastegar, 2007). این گیاه یک‌ساله، دیپلوئید، خودگشن و محتوای ۴۵ درصد روغن و ۲۵-۱۹ درصد پروتئین بوده و از راسته Tubiflorae و خانواده Pedaliaceae است (Silva et al., 2016). طول دوره رشد کنجد از سه تا شش ماه بسته به رقم متفاوت است و غالباً ۱۲۰-۱۰۰ روز طول می‌کشد و سازگار به شرایط اقلیمی کشور ایران و مقاوم به تنش خشکی است (Khajehpour, 2007). دانه کنجد بیشترین میزان روغن را در بین گیاهان روغنی دارد. روغن این گیاه کمتر از ۱۵ درصد اسید چرب اشباع اسید پالمیتیک و اسید استئاریک

* نگارنده پاسخگو: حمیدرضا عیسوند. پست الکترونیک: eisvand.hr@lu.ac.ir

و بیشتر از ۸۵ درصد اسیدهای چرب غیراشباع اسید اولئیک و اسید لینولئیک دارد (Silva et al., 2016).

آب عنصری حیاتی است که کمبود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک گسترش کشت در اراضی مستعد را با محدودیت مواجه می‌سازد. اعمال مدیریت صحیح و به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته به‌منظور حفظ ذخیره رطوبت و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک، ازجمله اقدامات مؤثر برای افزایش راندمان آبیاری و درنتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب است (Abedi-Koupai and Sohrab, 2004). استفاده بهینه و مناسب از آب اهمیت ویژه‌ای در تولید محصولات زراعی دارد (Zarei et al., 2010). خشکی یک پدیده اقلیمی است که در اثر فقدان یا کمبود رطوبت حادث‌شده و موجب کاهش عملکرد گیاهان زراعی می‌شود (Siosemarde et al., 2006). میثاق و همکاران (Misagh et al., 2016) گزارش دادند که تنش خشکی غیر از صفات عملکرد بیولوژیک، درصد پروتئین و روغن دانه، کلیه صفات کمی و کیفی کنجد را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. در بررسی خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد چهار رقم کنجد تحت تنش کم‌آبی، این تنش موجب کاهش ۴۲، ۴۸ و ۴۹ درصدی به‌ترتیب در تعداد کپسول در بوته، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک شد (Mehrabi and Ehsanzadeh, 2011).

در دهه‌های اخیر با افزایش مصرف کودهای شیمیایی، مشکلات جدی زیست‌محیطی بر جامعه تحمیل شده است. امروزه فناوری نانو در همه عرصه‌های علمی مانند بخش‌های مختلف کشاورزی در حال گسترش است (Das et al., 2004). نانوکودها در مقایسه با کودهای شیمیایی رایج راندمان مصرف بالاتری دارند و می‌توانند به‌صورت مطلوب در نقطه مناسبی از ناحیه رشد، عناصر غذایی خود را آزاد کنند که این عمل اثر معنی‌داری را در خصوصیات رشدی گیاهان ایجاد می‌کند (Mazaherinia et al., 2012). استفاده از نانوکودها منجر به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به‌حداقل رساندن اثرات منفی ناشی از مصرف بیش‌ازحد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد کود می‌شود (Askary et al., 2017). تبدیل مواد به مقیاس نانو، خواص فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و فعالیت‌های کاتالیزوری آن‌ها را تغییر می‌دهد. علاوه بر انحلال‌پذیری بیشتر، فعالیت‌های شیمیایی و قابلیت نفوذ در غشای سلولی در این نانو ذرات پدیدار می‌گردد (Monica and Cremonini, 2009). حیدری و همکاران (Heidari et al., 2016) گزارش دادند، کاربرد نانو اکسید آهن غیر از تعداد کپسول در بوته، صفات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک را تحت تنش خشکی بهبود بخشید. در تحقیق دیگری بر روی کنجد، به افزایش تعداد کپسول در بوته ناشی از کاربرد نانو کود آهن اشاره شده است (Ayobizadeh et al., 2017).

آهن به‌عنوان یک عنصر غذایی کم‌مصرف، جزء ضروری بسیاری از آنزیم‌ها همچون نیتروژناز، کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و نیترات ردوکتاز است و نقش اساسی در سنتز کلروفیل، نمو کلروپلاست، انتقال الکترون، فتوسنتز و متابولیسم گیاهان دارد (Ghasemian et al., 2010). بابائیان و همکاران (Babaeian et al., 2008) گزارش دادند که محلول‌پاشی آهن در شرایط تنش خشکی، عملکرد آفتابگردان را با بهبود بازده فتوشیمیایی و غلظت کلروفیل افزایش داد. افزایش عملکرد پروتئین دانه کنجد با کاربرد نانو اکسید آهن توسط حیدری و همکاران (Heidari et al., 2016) گزارش‌شده است. در گیاهان دیگری نظیر گندم نیز مشخص شده است که محلول‌پاشی نانواکسید آهن برای بهبود رسوب SDS به‌عنوان شاخصی از کیفیت نانوایی است و مقدار آهن دانه و همچنین بهبود سطح برگ مؤثر بوده است. با توجه به نقش آهن در فیزیولوژی گیاه و همچنین مشکلاتی که خاک‌های آهکی در تأمین آهن کافی برای گیاه دارند، استفاده از کود آهن به‌صورت نانواکسید می‌تواند ضمن بهبود رشد و عملکرد کمی گندم در این‌گونه خاک‌ها، ارزش تغذیه‌ای آن را نیز ازنظر آهن و پروتئین بهبود بخشد (Eisvand et al., 2014).

با توجه به اهمیت اخیر فناوری نانو در عرصه کشاورزی و همچنین ارزش استراتژیک گیاه کنجد و نقش مخرب تنش خشکی بر صفات کمی و کیفی این گیاه، آزمایش حاضر با هدف بررسی اثرات تنش خشکی و محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر صفات کمی و کیفی کنجد انجام گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در تابستان ۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۳ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۲۱۰ متر از سطح اجرا شد. عوامل موردبررسی در آزمایش شامل تنش خشکی در دو سطح عدم تنش (آبیاری تا رساندن رطوبت خاک به ۱۰۰

درصد ظرفیت زراعی) و تنش خشکی (آبیاری تا رساندن رطوبت خاک به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان عامل اصلی و محلول‌پاشی نانواکسید آهن در پنج سطح عدم محلول‌پاشی (شاهد)، محلول‌پاشی با آب (۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار)، نانو اکسید آهن ۰/۰۵ درصد (نیم کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار)، نانو اکسید آهن ۰/۱۰ درصد (یک کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار) و نانو اکسید آهن ۰/۱۵ درصد (یک و نیم کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب در هکتار) به‌عنوان عامل فرعی بودند. اندازه ذرات نانو ۲۰ نانومتر، درصد خلوص ۹۹/۲ درصد، دارای شکل کروی، چگالی ۰/۸۴ گرم بر مترمکعب و از شرکت نانو پیشگامان ایرانیان تهیه شد. برای اعمال تنش خشکی، ابتدا ظرفیت زراعی مزرعه تعیین شد. برای این کار، کرتی به ابعاد چهار مترمربع تهیه و به‌طور کامل از آب پر شد. سپس روی آن با پلاستیک محصور گردید تا خاک کاملاً از آب اشباع شود. پس از ۲۴ ساعت که آب موجود در خلل و فرج‌های درشت خاک توسط نیروی ثقل خارج شد، پلاستیک برداشته شد. در این هنگام، نمونه‌ای از خاک تهیه، پس از توزین در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. سپس نمونه را با ترازوی دقیق وزن و میزان رطوبت تبخیر شده محاسبه شد (Rafie and Darabi, 2007). در هنگامی‌که پلاستیک از روی کرت برداشته شد میزان ظرفیت زراعی مزرعه با دستگاه رطوبت‌سنج (TDR) نیز اندازه‌گیری شد، دو روش اعمال‌شده باهم مقایسه و تفاوت چندانی دیده نشد. تنش خشکی پس از استقرار کامل گیاه یعنی ۲۰ روز پس از کاشت اعمال شد.

به‌منظور تعیین درصد رطوبت وزنی خاک در هنگام ظرفیت زراعی از رابطه ۱ استفاده شد (Alizade, 1995).

$$W_m=W_2-W_1/W_1\times100 \qquad [۱]$$

که در این رابطه، W_m: درصد رطوبت وزنی خاک، W_2: وزن خاک مرطوب (گرم)، W_1: وزن خاک خشک (گرم) است.

جهت اعمال تیمار آبیاری، حجم آب مصرفی موردنیاز از طریق رابطه (۲) محاسبه شد (Gholinezhad et al., 2009).

$$V = ((FC - \theta_m)\times Pb\times Droot \times A)/E_i \qquad [۲]$$

که در این رابطه، V: حجم آب آبیاری برحسب مترمکعب، Fc: درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی، θ_m: درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، Droot: عمق توسعه ریشه برحسب متر، A: مساحت آبیاری شده برحسب مترمربع، E_i: راندمان آبیاری است.

محلول‌پاشی نانو اکسید آهن در دو مرحله‌ی ۶ و ۱۵ برگی و پس از اعمال تنش خشکی انجام شد. خاک محل آزمایش دارای بافت لوم رسی با نفوذپذیری کم بود. از مشخصات این خاک می‌توان به پایین بودن میزان نیتروژن، فسفر، پتاسیم، ماده آلی، آهن و میزان نسبتاً مطلوب اسیدیته، منگنز و روی برای کشت کنجد اشاره کرد (جدول ۱). اطلاعات مربوط به پارامترهای هواشناسی در طی دوره آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. در طول دوره اعمال تنش آبی، هیچ‌گونه بارندگی مؤثری مشاهده نشد. پیش از اجرای آزمایش و بر اساس نتایج آزمون خاک، میزان ۱۷۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن از منبع اوره، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم استفاده شد. کودهای فسفر و پتاسیم همراه با نیمی از کود نیتروژن پیش از کاشت و به‌صورت خاک کاربرد استفاده شدند. همچنین نیمی از کود نیتروژن باقی‌مانده به‌صورت سرک در هنگام ساقه رفتن به گیاه داده شد. غلظت بحرانی عناصر غذایی پتاسیم، فسفر، مس، آهن، روی و منگنز در خاک برای گندم در خوزستان به‌ترتیب ۲۵۰، ۱۲، ۱، ۸، ۱ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است (Tabatabaei, 2013). برای محافظت در برابر قارچ‌ها، بذور قبل از کشت به‌میزان توصیه‌شده (به نسبت یک در هزار) با قارچ‌کش کاپتان ضدعفونی شدند. کشت در تاریخ ۱۴ تیرماه بر روی پشته و به‌صورت ردیفی در کرت‌هایی که پیش‌ازاین آبیاری شده بود (هیرم‌کاری) انجام شد. هر کرت شامل پنج ردیف کشت به طول پنج‌متر بود. فاصله بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بوته‌ها روی ردیف‌ها پنج سانتی‌متر و عمق کاشت دو سانتی‌متر بود. همچنین فاصله بلوک‌ها از هم سه و نیم متر، فاصله بین کرت‌های اصلی چهار متر و فاصله بین کرت‌های فرعی یک متر در نظر گرفته شد. رقم کنجد مورد کشت داراب ۱۴ بود. از ویژگی‌های این رقم می‌توان به میانگین ارتفاع بوته ۱۲۵ سانتی‌متر، میانگین وزن هزار دانه سه گرم، میانگین عملکرد دانه ۱/۵ تن در هکتار، میانگین طول دوره رشد ۱۲۰ روز، میانگین روغن دانه ۵۳ درصد و متحمل بودن به خشکی اشاره کرد (Khajehpour, 2007). آبیاری مطابق با نیاز آبی گیاه و پس از اندازه‌گیری درصد رطوبت خاک با دستگاه رطوبت‌سنج (TDR) به‌صورت جوی و پشته‌ای انجام گردید. عمل تنک و واکاری در تاریخ دوم مردادماه بسته به نیاز در کرت‌ها انجام شد. برداشت کنجد به‌صورت دستی و در تاریخ دهم آبان‌ماه و در زمان ریزش

برگ‌ها و تغییر رنگ و رسیدگی دانه‌ها در کپسول‌های میانی متمایل به زرد شدن در بوته‌ها انجام شد.

به‌منظور اندازه‌گیری تعداد کپسول در بوته و وزن هزار دانه کنجد، در انتهای فصل رشد ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی از هر کرت برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد. سپس در آزمایشگاه صفات فوق اندازه‌گیری و ثبت شدند. همچنین جهت اندازه‌گیری عملکرد دانه، پس از حذف دو ردیف حاشیه هر کرت و ۵۰ سانتی‌متر از هر طرف ردیف‌های باقیمانده، سطحی معادل دو مترمربع جهت مقایسه عملکرد برداشت گردید. در سطح مذکور، کلیه بوته‌ها از سطح خاک توسط قیچی باغبانی جدا، شمارش و وزن گردیدند. سپس تمامی بوته‌ها در کیسه‌های پلاستیکی جداگانه قرار داده‌شده و پس از رسیدن با تکاندن بوته، دانه‌ها از کپسول جدا گردیدند. سپس وزن کل بذور و باقیمانده اندام هوایی هر کرت پس از خشک شدن به مدت ۵۲ ساعت (به‌منظور اطمینان از رسیدن به وزن ثابت) در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد آون اندازه‌گیری شدند. عملکرد بیولوژیک، از مجموع وزن خشک بخش هوایی گیاه به دست آمد. شاخص برداشت نیز از تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد بیولوژیک محاسبه گردید (Alizade, 1995). جهت اندازه‌گیری محتوای روغن دانه از دستگاه سوکسله و برای اندازه‌گیری محتوای پروتئین از دستگاه کجلدال استفاده شد (Kaufman, 1958; Salo-Vaananen and Koivistoinen, 1996). همچنین از حاصل‌ضرب محتوای روغن و پروتئین دانه در عملکرد دانه به‌ترتیب عملکرد روغن و پروتئین دانه محاسبه شد (Mahdavi Khorami et al., 2018). برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۳ استفاده شد. در صورت معنی‌دار بودن مقادیر F، میانگین‌ها با آزمون توکی (به‌واسطه کمتر بودن خطای نوع I در مقایسه با دانکن و LSD) در سطح احتمال پنج درصد مورد مقایسه قرار گرفتند.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Soil physical and chemical properties of experimental location

هدایت الکتریکی E.C	اسیدیته pH	بافت خاک Soil texture	لوم رس Clay	لوم Silt	مواد شن Sand	مواد آلی O.C	فسفر P	پتاسیم K	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn
$dS.m^{-1}$			----------%----------				----------$mg.kg^{-1}$----------				
0.59	7.51	Silty clay	33	45	22	0.53	2.10	235.00	5.00	1.26	5.80

جدول ۲. آمار هواشناسی شهرستان خرم‌آباد در طی دوره آزمایش

Table 2. Weather statistics of Khorramabad city during the experimental period

Month	ماه	میانگین دمای هوا Mean of air temperature (°C) حداکثر Maximum	میانگین دمای هوا Mean of air temperature (°C) حداقل Minimum	رطوبت نسبی RH (%)	بارندگی Precipitation (mm)
July	تیر	39.9	18.9	20.8	0.0
August	مرداد	40.2	20.2	19.3	0.0
September	شهریور	36.9	15.6	22.6	0.0
October	مهر	32.0	5.4	55.0	0.0
November	آبان	26.1	6.5	61.0	15.0

نتایج و بحث

تعداد کپسول در بوته

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد، برهمکنش رژیم آبیاری و نانو اکسید آهن بر تعداد کپسول در بوته کنجد معنی‌دار بود ($P<0.05$). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد، بیشترین تعداد کپسول در بوته در شرایط عدم تنش (۸۰/۳۰) و تنش خشکی (۷۲/۹۳) از تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن در شرایط عدم تنش (۴۸/۱۰) و تنش خشکی (۳۲/۹۲) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) به دست آمد (جداول ۴ و ۵).

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات موردانداز‌ه‌گیری تحت تأثیر عوامل آزمایش

Table 3. Analysis of variance (Mean squares) of measured traits affected by experiment factors

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	تعداد کپسول در بوته Number of capsules per plant	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain Yield	عملکرد بیولوژیک Biological Yield	شاخص برداشت Harvest index
Block	بلوک	2	35.33^{ns}	0.01^{ns}	7589.03^{ns}	103669.43^{ns}	1.00^{ns}
Drought stress (A)	تنش خشکی	1	943.45**	0.63**	748131.5**	6745226.9**	19.76**
Error a	خطای a	2	75.48	0.01	7395.51	135660.86	0.88
Foliar application (B)	محلول‌پاشی	4	526.95**	0.23**	623012.5**	12762356**	7.52**
A×B	محلول‌پاشی×تنش‌خشکی	4	159.54*	0.058*	12154.34*	723021.72*	3.19*
Error b	خطای b	16	43.18	0.004	4024.72	200251.76	0.91
CV (%)	ضریب تغییرات		*11.53*	*4.0*	*3.74*	*3.9*	*6.49*

Table 3. Continued **جدول ۳. ادامه**

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی (df)	محتوای روغن دانه Grain oil content	عملکرد روغن دانه Grain oil yield	محتوای پروتئین دانه Grain protein content	عملکرد پروتئین دانه Grain protein yield
Block	بلوک	2	1.50^{ns}	231.12^{ns}	0.10^{ns}	175.60^{ns}
Drought stress (A)	تنش خشکی	1	420.22**	626105.11**	3.09**	25709.91**
Error a	خطای a	2	2.38	6370.35	0.14	136.53
Foliar application (B)	محلول‌پاشی	4	31.21**	259528.88**	2.35**	38507.24**
A×B	محلول‌پاشی×تنش‌خشکی	4	6.78*	4235.10*	0.05$^{n.s}$	654.40*
Error b	خطای b	16	2.06	1300.06	0.40	198.10
CV (%)	ضریب تغییرات		*2.73*	*4.02*	*2.88*	*3.74*

ns،* و **: به‌ترتیب، غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۵ و ۱ درصد

ns, * and **: Non significant and significant at P<0.05 and P<0.01, respectively

نتایج آزمایش حاضر نشان داد، تنش خشکی اثر کاهشی بر تعداد کپسول در بوته کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۴۵/۰۳ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین مشاهده شد، با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، تعداد کپسول در بوته کنجد به‌ترتیب ۲۱/۹۵ و ۳۵/۰۷ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). نتایج آزمایش حاضر با یافته‌های حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh et al., 2009) مبنی بر کاهش شدید تعداد کپسول در بوته در اثر بروز تنش خشکی مطابقت داشت. این محققین دلیل آن را به نقش تنش خشکی در کاهش تولید مواد فتوسنتزی، کاهش رشد رویشی، کاهش تولید شاخه‌های اصلی و فرعی و افزایش ریزش کپسول‌های بوته نسبت دادند. ایوبی‌زاده و همکاران (Ayobizadeh et

al., 2017) گزارش دادند، کاربرد نانو کلات آهن موجب افزایش تعداد کپسول در بوته کنجد شد. این محققین دلیل آن را با نقش آهن در بهبود رشد و نمو، ارتفاع بوته و فراهمی مواد فتوسنتزی مرتبط دانستند. نتایج آزمایش حاضر با یافته‌های محققین فوق همخوانی داشت.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر صفات مورداندازه‌گیری تحت شرایط عدم تنش خشکی

Table 4. Comparison of mean the effect of iron oxide nanoparticle foliar application on measured traits under non-drought stress condition

محلول‌پاشی نانو اکسید آهن Foliar application of iron oxide nanoparticle	تعداد کپسول در بوته number of capsules per plant	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield
(FAION)		(g)	----------($kg.ha^{-1}$)----------	
شاهد Control	48.10^{e}	3.02^{b}	1501.08^{e}	10112.14^{e}
آب Water	55.39^{d}	2.97^{b}	1691.40^{cd}	11017.71^{d}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.05%	62.67^{c}	3.11^{ab}	1830.97^{c}	11878.11^{c}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.10%	73.24^{b}	3.16^{ab}	2041.79^{b}	12516.85^{b}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.15%	80.30^{a}	3.27^{a}	2205.76^{a}	14132.52^{a}

جدول ۴. ادامه

Table 4. Continued

محلول‌پاشی نانو اکسید آهن Foliar application of iron oxide nanoparticle	شاخص برداشت Harvest index	محتوای روغن دانه Grain oil content	عملکرد روغن دانه Grain oil yield	عملکرد پروتئین دانه Grain protein yield
(FAION)	----------(%)----------		----------($kg.ha^{-1}$)----------	
شاهد Control	14.85^{c}	54.26^{c}	814.48^{e}	315.78^{e}
آب Water	15.35^{b}	55.26^{bc}	934.66^{d}	362.51^{d}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.05%	15.41^{b}	55.86^{abc}	1022.77^{c}	402.42^{c}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.10%	16.31^{a}	56.43^{ab}	1152.18^{b}	451.78^{b}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.15%	15.60^{b}	57.54^{a}	1269.19^{a}	492.74^{a}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means in each column followed by similar letters are not significantly different at 0.05 probability level

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اختلاف معنی‌داری را در برهمکنش تنش خشکی و نانو اکسید آهن بر وزن هزار دانه کنجد نشان داد ($P<0.05$). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین وزن هزار دانه در شرایط عدم تنش (۳/۲۷ گرم) و تنش خشکی (۳/۰۷ گرم) از تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن در شرایط عدم تنش (۲/۹۷ گرم) و تنش خشکی (۲/۴۲ گرم) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) به دست آمد (جداول ۴ و ۵). در آزمایش حاضر، تنش خشکی اثر کاهشی بر وزن هزار دانه کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۱۹/۸۶ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین مشاهده شد، با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم

تنش و تنش خشکی، وزن هزار دانه کنجد به‌ترتیب ۴/۸۹ و ۳/۲۵ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). نتایج آزمایش حاضر با یافته‌های جین و همکاران (Jain et al., 2010) مبنی بر کاهش وزن هزار دانه کنجد درنتیجه اعمال تنش خشکی مطابقت داشت. این محققین دلیل آن را کاهش تولید و تجمع مواد فتوسنتزی در بذور کنجد با کاهش فتوسنتز درنتیجه اعمال تنش خشکی ذکر کردند. بقری و همکاران (Boghori et al., 2014) گزارش کردند که کاربرد نانو کلات آهن باعث افزایش وزن هزار دانه کنجد نسبت به شاهد شد. این محققین دلیل این افزایش را با نقش عنصر آهن در بهبود فتوسنتز و تجمع مواد فتوسنتزی در بذرها و متعاقب آن تولید دانه‌های سنگین‌تر مرتبط دانستند. نتایج آزمایش حاضر، یافته‌های محققین فوق را تصدیق می‌کند.

عملکرد دانه

مطابق جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، برهمکنش تنش خشکی و محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر عملکرد دانه کنجد معنی‌دار بود ($P<0.05$). نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین عملکرد دانه در شرایط عدم تنش (۲۲۰۵/۷۶ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۲۰۲۳/۲۵ کیلوگرم در هکتار) را در تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن را در شرایط عدم تنش (۱۵۰۱/۰۸ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۱۱۰۲/۸۸ کیلوگرم در هکتار) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) نشان داد (جداول ۴ و ۵). در آزمایش حاضر، تنش خشکی اثر کاهشی بر عملکرد دانه کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۳۷/۴۳ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، عملکرد دانه کنجد به‌ترتیب ۱۶/۹۹ و ۲۶/۰۹ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). قلی‌نژاد و درویش‌زاده (Gholinezhad and Darvishzadeh, 2015) کاهش عملکرد دانه کنجد با اعمال تنش خشکی را گزارش کردند. این محققین اظهار داشتند، تنش خشکی از طریق کاهش صفات وابسته به عملکرد مانند تعداد کپسول در بوته و وزن هزار دانه موجب کاهش عملکرد دانه شد؛ بنابراین، با توجه به کاهش تعداد کپسول در بوته و وزن هزار دانه با اعمال تنش خشکی در آزمایش حاضر، کاهش عملکرد دانه قابل‌انتظار است. حیدری و همکاران (Heidari et al., 2016) اظهار داشتند، عملکرد دانه کنجد با کاربرد نانو اکسید آهن افزایش یافت. این محققین دلیل این افزایش را با نقش عنصر غذایی آهن در بهبود صفات وابسته به عملکرد همچون تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه مرتبط دانست. نتایج آزمایش حاضر مطابق با یافته‌های محققین فوق بود.

عملکرد بیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد، برهمکنش رژیم آبیاری و نانو اکسید آهن بر عملکرد بیولوژیک کنجد معنی‌دار بود ($P<0.05$). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین عملکرد بیولوژیک در شرایط عدم تنش (۱۴۱۳۲/۵۲ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۱۲۹۰۳/۷۱ کیلوگرم در هکتار) از تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن در شرایط عدم تنش (۱۰۱۱۲/۱۴ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۹۱۵۹/۰۴ کیلوگرم در هکتار) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) به دست آمد (جداول ۴ و ۵). در آزمایش حاضر، تنش خشکی اثر کاهشی بر عملکرد بیولوژیک کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۲۲/۹۱ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین مشاهده شد، با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، عملکرد بیولوژیک کنجد به‌ترتیب ۱۵/۹۵ و ۱۶/۰۰ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). محرابی و احسان‌زاده (Mehrabi and Ehsanzadeh, 2011) اظهار داشتند، تنش خشکی از طریق کاهش صفات زراعی همچون تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول موجب کاهش عملکرد ماده خشک کنجد گردید. کاربرد نانو کلات آهن، عملکرد بیولوژیک کنجد را افزایش داد (Boghori et al., 2014). این محققین دلیل آن را به نقش عنصر غذایی آهن در افزایش فعالیت فتوسنتزی، افزایش تعداد شاخه فرعی، افزایش تعداد کپسول و تعداد دانه در بوته و متعاقب آن افزایش ماده خشک در بوته نسبت دادند؛ بنابراین با توجه به یافته‌های محققین فوق، نتایج آزمایش حاضر قابل توجیه است.

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، اختلاف معنی‌داری را در برهمکنش تنش خشکی و نانو اکسید آهن بر شاخص برداشت

کنجد نشان داد ($P<0.05$). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد، بیشترین شاخص برداشت در شرایط عدم تنش (۱۶/۳۱ درصد) و تنش خشکی (۱۵/۶۸ درصد) به‌ترتیب از تیمارهای محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت‌های ۰/۱۰ و ۰/۱۵ درصد و کمترین آن در شرایط عدم تنش (۱۴/۸۵ درصد) و تنش خشکی (۱۰/۹۱ درصد) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) به دست آمد (جداول ۴ و ۵). همچنین مشاهده شد، تنش خشکی اثر کاهشی بر شاخص برداشت کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۳/۸۶ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. علاوه بر این، با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، شاخص برداشت کنجد به‌ترتیب ۰/۱۹ و ۱/۸۹ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). نتایج آزمایش حاضر با یافته‌های ایوبی‌زاده و همکاران (Ayobizadeh et al., 2017) مبنی بر کاهش شاخص برداشت با اعمال تنش خشکی مطابقت داشت. این محققین دلیل این کاهش را تأثیر بیشتر کمبود رطوبت بر فرآیندهای زایشی در مقایسه با رشد رویشی ذکر کردند. در آزمایش حاضر مشاهده شد، محلول‌پاشی نانو اکسید آهن به یک میزان بر عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک مؤثر نبود. به‌طوری‌که با کاربرد نانو اکسید آهن افزایش بیشتری در عملکرد دانه نسبت به عملکرد بیولوژیک مشاهده شد و این نقش بسزایی در افزایش شاخص برداشت کنجد داشت. بحرانی (Bahrani, 2015) نیز نتایج مشابهی را در کلزا گزارش کرد.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر صفات مورداندازه‌گیری تحت شرایط تنش خشکی

Table 5. Comparison of mean the effect of iron oxide nanoparticle foliar application on measured traits under drought stress conditions

محلول‌پاشی نانو اکسید آهن Foliar application of iron oxide nanoparticle (FAION)	تعداد کپسول در بوته number of capsules per plant	وزن هزار دانه 1000-grain weight (g)	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg.ha^{-1})
شاهد Control	32.92^{de}	2.42^{b}	1102.88^{e}	9159.04^{e}
آب Water	37.40^{d}	2.56^{b}	1301.00^{d}	10113.33^{d}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.05%	47.35^{c}	2.97^{a}	1495.23^{c}	10838.26^{c}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.10%	59.40^{b}	3.03^{a}	1769.49^{b}	11904.26^{b}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.15%	72.93^{a}	3.07^{a}	2023.25^{a}	12903.71^{a}

جدول ۶. ادامه

Table 6. Continued

محلول‌پاشی نانو اکسید آهن Foliar application of iron oxide nanoparticle (FAION)	شاخص برداشت Harvest index (%)	محتوای روغن دانه Grain oil content (%)	عملکرد روغن دانه Grain oil yield (kg.ha^{-1})	عملکرد پروتئین دانه Grain protein yield (kg.ha^{-1})
شاهد Control	10.91^{d}	43.96^{d}	484.82^{e}	237.13^{e}
آب Water	14.20^{bc}	46.67^{c}	607.17^{d}	290.93^{d}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.05%	13.79^{c}	48.24^{bc}	721.29^{c}	337.03^{c}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.10%	14.86^{b}	50.66^{ab}	896.42^{b}	400.43^{b}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.15%	15.68^{a}	52.45^{a}	1061.19^{a}	466.95^{a}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means in each column followed by similar letters are not significantly different at 0.05 probability level

محتوای روغن دانه

مطابق جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، برهمکنش تنش خشکی و نانو اکسید آهن بر محتوای روغن دانه کنجد معنی‌دار بود ($P<0.05$). نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین محتوای روغن دانه در شرایط عدم تنش (۵۷/۵۴ درصد) و تنش خشکی (۵۲/۴۵ درصد) را در تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن را در شرایط عدم تنش (۵۴/۲۶ درصد) و تنش خشکی (۴۳/۹۶ درصد) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) نشان داد (جداول ۴ و ۵). در آزمایش حاضر، تنش خشکی اثر کاهشی بر محتوای روغن دانه کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۶/۴۹ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، محتوای روغن دانه کنجد به‌ترتیب ۱/۶۸ و ۴/۲۱ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). نتایج آزمایش حاضر مغایر با یافته‌های زارعی و همکاران (Zarei et al., 2010) مبنی بر عدم معنی‌دار بودن تنش خشکی بر محتوای روغن دانه کلزا بود؛ اما با نتایج جلیلیان و همکاران (Jalilian et al., 2012) که اظهار داشتند تنش خشکی به‌واسطه کاهش طول دوره پر شدن دانه و تغییر در متابولیسم مواد و متعاقب آن افزایش اکسیداسیون اسیدهای چرب سبب کاهش محتوای روغن دانه آفتابگردان می‌شود، همخوانی داشت. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2012) نیز افزایش محتوای روغن دانه کنجد با کاربرد آهن را گزارش کردند. این محققین دلیل این افزایش را با نقش عنصر آهن در کاهش اکسیداسیون اسیدهای چرب و بهبود تولید آن‌ها مرتبط دانستند. نتایج آزمایش حاضر، موافق با یافته‌های محققین فوق بود.

عملکرد روغن دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد، برهمکنش رژیم آبیاری و نانو اکسید آهن بر عملکرد روغن دانه کنجد معنی‌دار بود ($P<0.05$). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین عملکرد روغن در شرایط عدم تنش (۱۲۶۹/۱۹ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۱۰۶۱/۱۹ کیلوگرم در هکتار) از تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن در شرایط عدم تنش (۸۱۴/۴۸ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۴۸۴/۸۲ کیلوگرم در هکتار) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) به دست آمد (جداول ۴ و ۵). در آزمایش حاضر، تنش خشکی اثر کاهشی بر عملکرد روغن کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۴۵/۷۰ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین مشاهده شد، با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، عملکرد روغن کنجد به‌ترتیب ۱۹/۴۱ و ۳۲/۰۳ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). مهرابی و احسان‌زاده (Mehrabi and Ehsanzadeh, 2011) کاهش عملکرد روغن دانه کنجد با اعمال تنش خشکی را گزارش کردند. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2012) نیز افزایش عملکرد روغن دانه کنجد با اعمال عنصر غذایی آهن را نشان دادند. با توجه به نقش مستقیم صفات عملکرد دانه و محتوای روغن دانه در محاسبه عملکرد روغن، بنابراین هر عاملی که این دو صفات را کاهش (مانند تنش خشکی) یا افزایش (مانند نانو اکسید آهن) دهد موجب کاهش یا افزایش عملکرد روغن دانه می‌شود (Mehrabi and Ehsanzadeh, 2011; Ahmadi et al., 2012). نتایج آزمایش حاضر، یافته‌های محققین فوق را تأیید می‌کند.

عملکرد پروتئین دانه

مطابق جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، برهمکنش تنش خشکی و نانو اکسید آهن بر عملکرد پروتئین دانه کنجد معنی‌دار بود ($P<0.05$). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد، بیشترین عملکرد پروتئین دانه در شرایط عدم تنش (۴۹۲/۷۴ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۴۶۶/۹۵ کیلوگرم در هکتار) از تیمار محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد و کمترین آن در شرایط عدم تنش (۳۱۵/۷۸ کیلوگرم در هکتار) و تنش خشکی (۲۳۷/۱۳ کیلوگرم در هکتار) از تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) به دست آمد (جداول ۴ و ۵). همچنین مشاهده شد، تنش خشکی اثر کاهشی بر عملکرد پروتئین دانه کنجد داشت، اما در چنین شرایطی کاربرد نانو اکسید آهن به‌طور متوسط ۴۰/۹۳ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد. علاوه بر این، با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد تحت شرایط عدم تنش و تنش خشکی، عملکرد پروتئین دانه کنجد به‌ترتیب ۱۸/۳۳ و ۲۷/۸۲ درصد افزایش نشان داد (جداول ۴ و ۵). حیدری و همکاران (Heidari et al., 2011) اظهار داشتند، تنش خشکی عملکرد پروتئین دانه کنجد را کاهش داد. همچنین

در مطالعه‌ای حیدری و همکاران (Heidari et al., 2016) افزایش عملکرد پروتئین دانه کنجد با اعمال نانو اکسید آهن را گزارش دادند. این محققین اظهار داشتند، عملکرد دانه نقش مستقیمی در عملکرد پروتئین دانه دارد و هر عاملی که عملکرد دانه را کاهش یا افزایش دهد می‌تواند عملکرد پروتئین دانه را نیز کاهش و یا افزایش دهد؛ بنابراین، با توجه به کاهش و افزایش عملکرد دانه با اعمال تنش و نانو اکسید آهن در آزمایش حاضر، کاهش و افزایش عملکرد پروتئین دانه با اعمال تیمارهای فوق قابل توجیه است.

محتوای پروتئین دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد، اثرات اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر محتوای پروتئین دانه کنجد معنی‌دار ($P<0.01$) بودند و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت. نتایج مقایسه میانگین نشان داد، بیشترین محتوای پروتئین دانه در شرایط تنش خشکی (۲۲/۳۶ درصد) و کمترین آن در شرایط عدم تنش خشکی (۲۱/۵۱ درصد) به دست آمد (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر محتوای پروتئین دانه کنجد

Table 5. Comparison of mean the effect of drought stress on grain protein content of sesame

تنش خشکی Drought stress (DS)	محتوای پروتئین دانه Grain protein content (%)
عدم تنش خشکی Non Drought Stress	21.51^{b}
تنش خشکی Drought Stress	22.36^{a}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means in each column followed by similar letters are not significantly different at 0.05 probability level.

در مقایسه میانگین سطوح مختلف کاربرد نانو اکسید آهن، بیشترین میزان محتوای پروتئین دانه را محلول‌پاشی نانو اکسید آهن با غلظت ۰/۱۵ درصد (۲۲/۶۵ درصد) و کمترین آن را شرایط عدم محلول‌پاشی (شاهد) (۲۱/۰۳) نشان داد (جدول ۷). در آزمایش حاضر مشاهده شد، کاربرد نانو اکسید آهن نسبت به عدم کاربرد (شاهد) و کاربرد آب به‌ترتیب ۱/۳۱ و ۰/۷۳ درصد محتوای پروتئین دانه کنجد را افزایش داد. همچنین با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ درصد، محتوای پروتئین دانه کنجد ۰/۵۵ درصد افزایش نشان داد (جدول ۷). حیدری و همکاران (Heidari et al., 2011) گزارش دادند، تنش خشکی درصد نیتروژن دانه کنجد را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. کاربرد نانو اکسید آهن موجب افزایش درصد نیتروژن دانه کنجد شد (Heidari et al., 2016). با توجه به این‌که نیتروژن مهم‌ترین عنصر در افزایش محتوای پروتئین دانه است (Gan et al., 2008)، بنابراین می‌توان علت افزایش محتوای پروتئین دانه در آزمایش حاضر را با نقش تیمارهای اعمال‌شده در جذب و متابولیسم نیتروژن مرتبط دانست.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی نانو اکسید آهن بر محتوای پروتئین دانه کنجد

Table 7. Comparison of mean the effect of iron oxide nanoparticle foliar application on sesame Grain protein content

محلول‌پاشی نانو اکسید آهن Foliar application of iron oxide nanoparticle (FAION)	محتوای پروتئین دانه Grain protein content (%)
شاهد Control	21.03^{c}
آب Water	21.61^{b}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.05%	22.10^{ab}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.10%	22.26^{a}
محلول‌پاشی نانو اکسید آهن FAION 0.15%	22.65^{a}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means in each column followed by similar letters are not significantly different at 0.05 probability level

نتیجه‌گیری نهایی

تنش خشکی غیر از محتوای پروتئین دانه، صفات تعداد کپسول در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، محتوای روغن دانه، عملکرد روغن دانه و عملکرد پروتئین دانه را کاهش داد. با توجه به نقش اساسی آهن در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک گیاه ازیک‌طرف و کمبود آهن که معمولاً در خاک‌های آهکی برای گیاه حادث می‌شود از طرف دیگر، کاربرد نانو اکسید آهن غیر از محتوای پروتئین دانه، کلیه صفات اندازه‌گیری شده در هر

دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی را بهبود بخشید. در بین سطوح مختلف محلول‌پاشی، غیر از شاخص برداشت کاربرد غلظت ۰/۱۵ درصد نانو اکسید آهن بیشترین تأثیر را در افزایش صفات موردانداز‌ه‌گیری نشان داد. به‌طورکلی اگرچه کاربرد نانو اکسید آهن به‌ویژه غلظت ۰/۱۵ درصد آن برای کاهش اثرات زیان‌بار تنش خشکی و بهبود صفات کمی و کیفی گیاه کنجد تحت شرایط اقلیمی شهر خرم‌آباد توصیه می‌شود؛ اما با همه این مزایا نباید ازنظر دور داشت که با توجه به مضرات آلایندگی نانو ذرات به‌عنوان آئروسول، لذا بدون در نظر داشتن جنبه‌های زیست‌محیطی آن‌ها، نباید اقدام به استفاده بی‌حدواندازه از آن‌ها بشود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

منابع

Abedi-koupai, J., Sohrab, F., 2004. Evaluating the application of superabsorbent polymers on soil water capacity and potential on three soil textures. Iranian Journal of Polymer Science and Technology. 3, 163-173. [In Persian with English Summary].

Ahmadi, J., Seyfi, M.M., Amini, M., 2012. Effect of spraying micronutrients Fe, Zn and Ca on grain and oil yield of sesame (*Sesamus indicum* L.) varieties. Journal of Crop Production. 5, 115-130.

Alizade, A., 1995. Increase of plants yield. Mashhad JDM Press. 300p. [In Persian].

Askary, M., Talebi, S.M., Amini, F., Dousti, A., 2017. Effects of iron nanoparticles on *Mentha piperita* L. under salinity stress. Biologija. 63, 65-75.

Ayobizadeh, N., Laei, G., Amini Dehaghi, M., Masood Sinaki, J., Bidokhti, S.R., 2017. Effect of nano-iron and folic acid foliar application on yield and yield components of sesame varieties after wheat cultivation under drought stress conditions. Journal of Crop Production Research. 9, 283-312. [In Persian with English Summary].

Babaeian, M., Heidari, M., Ghanbari, A., 2008. Effects of foliar micronutrient application on osmotic adjustments, grain yield and yield components in sunflower (*Alster cultivar*) under water stress at three stages. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 40, 119-129. [In Persian with English Summary].

Bahrani, A., 2015. Effect of some micro and macro nutrients on seed yield and oil content of rapeseed (*Brassica napus* L.). International Journal of Chemical Environmental and Biological Sciences. 3, 71-74.

Boghori, M., Shamsi, H., Morovati, A., 2014. Effect of nano iron chelates on yield and amount iron and rate oil of sesame cultivar Darab 14. Journal of Plant Ecophysiology. 6, 69-79. [In Persian with English Summary].

Das, R., Kiley, P.J., Segal, M., Norville, J., Yu, A.A., Wang, L., Lebedev, N., 2004. Integration of photosynthetic protein molecular complexes in solid-state electronic devices. Nano Letters, 4, 1079-1083.

Eisvand, H.R., Esmaeili, A., Mohammadi, M., 2014. Effects of iron oxide nanoparticles on some quantity, quality and physiological characteristics in wheat (*Triticum aestivum* L.) at Khoramabad climate. Iranian Journal of Field Crop Science, 45, 287-298. doi: 10.22059/ijfcs.2014.51907

Gan, Y., Malhi, S.S., Brandt, S., Katepa-Mupondwa, F., Stevanson, C., 2008. Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of juncea canola under diverse environments. Journal of Agronomy. 100, 285-295.

Ghasemian, V., Ghalavand, A., Soroosh zadeh, A., Pirzad, A., 2010. The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed. Journal of Phytology. 2, 73-79 .

Gholinezhad, E., Aynaband, A., Hassanzade, A., Noormohamadi, Gh., Bernousi, I., 2009. Study of the effect of drought stress on yield, yield components and harvest index of sunflower hybrid iroflor at different levels of nitrogen and plant population. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 37, 85-94 .

Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., 2015. Effect of mycorrhizal fungi on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) landraces under different irrigation levels.

Journal of Agricultural Science. 25(3), 119-135. [In Persian with English Summary].

Hassanzadeh, M., Ebadi, A., 2009. Investigation of water stress on yield and yield components of Sesame (*Sesame indicum* L.) in Moghan region. Research Journal of Environmental Science. 3, 239-244.

Heidari, M., Goleg, M., Ghorbani, H., Baradarn Firozabad, M., 2016. Effect of drought stress and foliar application of iron oxide nanoparticles on grain yield, ion content and photosynthetic pigments in sesame (*Sesamum indicum* L.). Iranian Journal of Filed Crop Science. 46, 619-628. [In Persian with English Summary].

Heidari, M., Galavi, M., Hassani, M., 2011. Effect of sulfur and iron fertilizers on yield, yield components and nutrient uptake in Sesame (*Sesamum indicum* L.) under water stress. African Journal of Biotechnology, 10, 8816-8822.

Jain, S., Yue-Lioang, R., Mei-wang, L. E., Ting-Xian, Y., Xiao-Wen, Y., Hong-Ving, Z., 2010. Effect of drought stress on sesame growth and yield characteristics and comprehensive evaluation of drought tolerance. Chinese Journal of Oil Crop Sciences. 32, 525-533.

Jalilian, J., Modarres Sanavy, S.A.M., Saberali, S.F., Asilan, K.S., 2012. Effects of the combination of beneficial microbes and nitrogen on sunflower seed yields and seed quality traits under different irrigation regimes. Field Crops Research. 127, 26–34.

Kaufman, H. P., 1958. Analyse der fette and fettprodukte. Springer Verlag, Berlin.

Khajehpour, M.R., 2007. Industrial Cultivars of Jihad Publishing House. Isfahan Industrial Branch. 580p. [In Persian].

Mahdavi Khorami, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., Rezvanbidokhti, Sh., Damavandi, A., 2018. Investigation of relationship between some quantitative and qualitative characteristics affecting sesame yield under nitrogen, potassium and drought stress. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 28, 15-34. [In Persian with English Summary].

Mazaherinia, S. Astaraei, A.R., Monshi, A., Fotovat, A., 2012. Comparison of iron oxides (ordinary and nano) and urban solid waste compost effect on nutrition of wheat plant. Agronomy Journal (Pajouhesh and Sazandegi). 96, 103-110. [In Persian with English Summary].

Mehrabi, Z., Ehsanzadeh, P., 2011. A study on physiological attributes and grain yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars under different soil moisture regimes. Journal of Crop Improvement, 13, 75-88. [In Persian with English Summary].

Misagh, M., Movahhedi Dehnavi, M., Yadavi, A.R., Khadem Hamze, H.R., 2016. Improvement of yield, oil and protein percentage of sesame (*Sesamum indicum* L.) under drought stress by foliar application of zinc and boron. Journal of Crop Production. 9, 163-180. [In Persian with English Summary].

Monica, R.C., Cremonini, R., 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia. 62, 161-165.

Rafie, M.R., Darabi, A., 2007. A study of the effects of frequency and depth of irrigation on total and marketable yield and yield components of potato cultivars. The Scientific Journal of Agriculture. 30, 30-39. [In Persian with English Summary].

Rastegar, M., 2007. Industrial Plants Cultivation. Jihad University Press. Ferdowsi University of Mashhad. 376p. [In Persian].

Salo-vaananen, P.P., Koivistoinen, P.E., 1996. Determination of protein in foods: comparison of net protein and crude protein (N6.25) values. Journal of Food Chemistry. 57, 27-31.

Silva, R.T., Oliveira, A.B., Lopes, M.D., Guimarães, M.A., Dutra, A.S., 2016. Physiological quality of sesame seeds produced from plants subjected to water stress. Revista Ciência Agronômica. 47, 643-648.

Siosemarde, A., Ahmadi, A., Poustini, K., Mohammadi, V., 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. Field Crops Research. 98, 229-222.

Tabatabaei, S.J., 2013. Principles of mineral nutrition of plants. Tabriz University Press. 544p. [In Persian].

Zarei, G., Shamsi, H., Dehghani, S.M., 2010. The effect of drought stress on yield, yield components and seed oil content of three autumnal rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.). Journal of Research in Agricultural Science. 6, 29-36.