تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۰۴-۹۱

مقاله پژوهشی

واکنش اگروفیزیولوژیکی کینوا (*Chenopodium quinoa*) به محلول‌پاشی نانو ذرات آهن و پرولین در تاریخ‌های مختلف کشت

رحمت صالحی[۱]، عباس ملکی[۱*]، محمد میرزایی حیدری[۲]، علیرضا رنگین[۳]، امیر میرزایی[۴]

۱-گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام، ایلام، ایران

۲-گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۳- گروه زیست شناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام، ایلام، ایران

۴- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران

* مسئول مکاتبه: maleki97@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸ **DOI: 10.22034/CSRAR.2024.339946.1229**

چکیده

به منظور بررسی امکان سازگاری اکوفیزیولوژیکی گیاه کینوا در تاریخ‌های مختلف کشت تحت تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات آهن و پرولین، آزمایشی در دو سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در مزرعه مرکز تحقیقات سرآبله واقع در استان ایلام به صورت اسپلیت- اسپلیت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل تاریخ کاشت در ۳ تاریخ ۱۵ بهمن، ۳۰ بهمن و ۱۵ اسفند بود. عامل فرعی شامل پرولین در ۲ سطح عدم مصرف و مصرف بود. عامل فرعی فرعی شامل نانو ذرات آهن در چهار سطح عدم مصرف، ۰/۳ گرم، ۰/۶ گرم و ۰/۹ گرم بود. نتایج نشان داد که اثر متقابل تاریخ کاشت، نانوذرات آهن و پرولین بر وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت معنی‌دار بود. در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه، مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانو ذرات آهن بیشترین تعداد شاخه گل‌دهنده به‌تعداد ۳۱/۴ عدد حاصل گردید. بیشترین وزن هزار دانه در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانو ذرات آهن به‌مقدار ۵/۸۷ گرم به‌دست آمد. در تمامی تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش وزن هزار دانه و تعداد شاخه گل‌دهنده شد. بیشترین عملکرد در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند، مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین به‌مقدار ۲۹۴۸/۲ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده تاریخ کشت پانزدهم اسفند، مصرف پرولین و تیمار ۰/۹ گرم نانوذرات آهن برای حصول تولید دانه بالا در شرایط کشت منطقه به جهت افزایش کمی اجزاء عملکرد توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، اجزای عملکرد، ریزمغذی‌ها، سازگاری اکوفیزیولوژیکی، عملکرد

مقدمه

ایران کشوری با تنوع آب و هوایی فراوان و جمعیتی رو به رو رشد دارد (Maleki *et al*., 2020; Foladvand *et al*., 2017). تأمین نیاز غذایی مردم به میزان کافی و با تنوع و کیفیت مطلوب با استفاده از پتانسیل‌های تولید محصولات کشاورزی، از ضروریات و الزامات کشور است (Fallah *et al*., 2020; Shamsibeiranvand *et al*., 2017). امروزه مصرف کینوا در کشورهای دیگر جهان نیز بسیار مرسوم شده است (Fathi and Kardoni, 2020; Hinojosa *et al*., 2019). در اکثر زمین‌های لم یزرع کشور که تا ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر شوری در اطراف آن وجود دارد (Bahamin *et al*., 2021; Fathi and Bahamin, 2018; Zabet *et al*., 2015) و هیچ گیاهی کشت نمی‌شود. می‌توان این گیاه را کشت کرد (Lavini *et al*., 2014).

کاشت کینوا به دلیل نیاز آبی کم می‌تواند گسترش یابد (Hinojosa *et al*., 2019; Jamali *et al*., 2016). با کینوا جایگزین عالی برای برنج محسوب می‌شود و پخت ترکیبی آن با برنج می‌تواند ایران را از واردات برنج بی‌نیاز و سالانه یک تا دو میلیارد دلار صرفه‌جویی ارزی ایجاد نماید (Jamali *et al*., 2016). بذور کینوا به طور متوسط دارای ۱۶ درصد پروتئین هستند که بالاتر از مقدار پروتئین در بذر سایر غلات است (Abuggadare *et al*., 2009).

با توجه به افزایش رو به رشد نیاز غذایی ایران و خشکسالی‌های اخیر (Dawoudian *et al*., 2021; Kardoni *et al*., 2019; Bahamin *et al*., 2019)، لازم است تا بتوان مناطق کشت نشده و مستعد کشاورزی را به گیاهانی اختصاص

داد که مناسب این شرایط باشند (Esfandiarfateh *et al*., 2019). با توجه به این که در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک نظیر، اغلب کشور ایران، آب به عنوان یک عامل محدود کننده مطرح است؛ امکان کشت دیم و مناطق مستعد کشت دیم ارقام مختلف کینوا و دانستن بهترین تاریخ کشت این محصول ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (Jamali, 2017). تصمیم‌گیری در مورد زمان کاشت مطلوب یک گیاه زراعی بسیار با اهمیت بوده و از عوامل مهم جهت کسب حداکثر عملکرد در گیاهان می‌باشد. تأثیر عوامل محیطی بر مراحل فنولوژیکی گیاه باعث می‌شود که تاریخ کاشت از منطقه‌ای به منطقه دیگر و حتی در یک منطقه بین ژنوتیپ‌ها متفاوت باشد (Esfandiarfateh *et al*., 2019). با تعیین بهترین زمان کاشت در هر منطقه می‌توان با حفظ گیاه از خطراتی مانند سرمازدگی، آفات و بیماری‌ها، به عملکرد قابل قبولی دست یافت (Zamani and Javadi, 2019).

آهن نیز از نهاده‌های مهم در تولید محصول است و در شرایط کمبود آهن، میزان فتوسنتز و سرعت تثبیت دی اکسید کربن در واحد سطح برگ کاهش می‌یابد. در نتیجه از ذخیره قند و نشاسته در برگ‌ها کاسته می‌شود که این امر موجبات کاهش وزن هزار دانه و عملکرد دانه را فراهم می‌آورد (Abkar *et al*., 2019). از طرفی انباشت پرولین در بافت گیاهی که در معرض استرس قرار دارند، سبب افزایش خاصیت آنتی‌اکسیدانی ذخیره نیتروژن و کربن برای رشد پس از تنش تثبیت ماکرومولکول‌ها، حفاظت غشاها از دناتوره شدن حفظ آماس سلول و افزایش منبع انرژی می‌شود. برگ به طور گسترده‌ای به عنوان مواد غذایی برای انسان و دام استفاده می‌شود و منبع ارزان قیمت ویتامین‌ها و مواد معدنی را تشکیل می‌دهد. به طور کلی، برگ‌های جوان‌تر برای غذای انسان مورد استفاده قرار می‌گیرند (Dolatshah *et al*., 2019).

اضافه کردن عناصر ریز مغذی به خاک و یا به صورت محلول‌پاشی، علاوه بر افزایش تولید، غلظت عناصر غذایی را در محصولات کشاورزی از جمله غلات افزایش می‌دهد (Fathi *et al*., 2017). آهن یکی از این عناصر است که نقش اساسی در واکنش‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و فرایندهای متابولیکی مثل تثبیت نیتروژن، ساخت کلروفیل و تیلاکوئید، توسعه‌ی کلروپلاست، تولید رنگدانه‌ها و به عنوان کاتالیزور در فعالیت‌های آنزیمی از جمله آنزیم‌های مسیر تنفس نوری و گلیکولات و آنزیم‌های تنظیم و کنترل تعرق گیاه شرکت داشته (Dolatshah *et al*., 2019) و منجر به افزایش کمی و کیفی محصولات می‌شود (Javadi *et al*., 2019). از طرفی فناوری نانومانند کودهای نانوآهن در کلیه عرصه‌های علمی از جمله بخش‌های مختلف کشاورزی در حال گسترش می‌باشد (Abkar *et al*., 2019; Ahmadi *et al*., 2020). از جمله ویژگی‌های قابل توجه مواد نانو سبک و کوچک بودن آن‌ها، استفاده در مقادیر کم چندکاربردی بودن و صرفه‌جویی در مواد مصرفی است. استفاده از نانوکودها که همه خصوصیات لازم مانند غلظت مؤثر، قابلیت حل‌پذیری مناسب، ثبات و تأثیرگذاری بالا و رهایش کنترل شده را دارند، سبب افزایش کارایی عناصر غذایی و نهایتاً عملکرد می‌شوند (Ebrahimnia *et al*., 2019).

هدف اصلی از اجرای این طرح، تعیین بهترین تاریخ کاشت برای منطقه بوده چرا که کینوا برای منطقه مورد کاشت گیاهی جدید به حساب می‌آید. اما با توجه به‌اینکه هر تاریخ کاشتی غیر از تاریخ کاشت مناسب، عملاً گیاه را با تنش سرمایی یا گرمایی و خشکی مواجه می‌کند، استفاده از پرولین به‌عنوان یک ترکیب تنظیم‌کننده درونی، مقاوم کننده و ضدتعرق؛ و نانوذرات آهن نیز به‌عنوان یک ترکیب ضد تنش و تقویت‌کننده سیستم فتوسنتزی می‌تواند تا حد زیادی اثرات تنش را تعدیل نماید؛ لذا استفاده از سطوح مختلف این ترکیبات ضدتعرق و مقاوم کننده به تنش در تاریخ‌های مختلف کاشت و برهمکنش آن‌ها بر هم‌دیگر می‌توانست محققان را به نتایج علمی برای کشت این گیاه همراه با ترکیبات تعدیل کننده تنش برساند. ضمن اینکه کاشت گیاهان در تاریخ مناسب و سیستم آبی هم به‌دلیل عدم کنترل بر تغییرات آب و هوایی، همواره با تنش همراه است بنابراین نتایج این طرح می‌تواند حاوی نکات جدیدی در مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی کشت گیاهان زراعی باشد. بنابراین تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات آهن و پرولین بر عملکرد، شاخص برداشت و خصوصیات مورفولوژیکی و زراعی گیاه کینوا در تاریخ‌های مختلف کشت انجام شد.

مواد و روش‌ها

مکان اجرای طرح

این تحقیق در دو سال زراعی متوالی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و

۱۳۹۸-۱۳۹۹ در مزرعه مرکز تحقیقات سرابله در شمال شرقی شهر ایلام، بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۱ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۷ دقیقه و ارتفاع ۱۰۰۰ متر از سطح دریا انجام گردید. قبل از اجرای آزمایش نمونه خاک به صورت تصادفی از زمین محل اجرای آزمایش برداشت و جهت تعیین خصوصیات خاک به آزمایشگاه منتقل شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the test site soil

بافت خاک	شن	رس	سیلت	هدایت الکتریکی	اسیدیته	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب
Soil texture	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	EC ($dS\ m^{-1}$)	pH	OC (%)	Total nitrogen (%)	Absorbable phosphorus ($mg\ kg^{-1}$)	Absorbable potassium ($mg\ kg^{-1}$)
لوم رسی	32	35	43	1.1	7.1	0.3	0.11	9.5	245

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی محل آزمایش در دو سال ۱۳۹۷و۱۳۹۸

Table 2- Meteorological information of the test site in 2018 and 2019

سال	میانگین تبخیر – تعرق	میانگین رطوبت حداکثر	میانگین رطوبت حداقل	میانگین بارش	دمای سطح خاک	میانگین درجه حرارت	حداقل درجه حرارت	حداکثر درجه حرارت
Year	Average evaporatio–transpiration (mm)	Average maximum (%) humidity	Average minimum humidity (%)	Average rainfall (mm)	surface Soil temperature (°C)	Average temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)
2019	10.45	55	23	62.71	10.6	18.3	11.4	25.2
2020	9.63	57	24	93.25	10.9	14.9	11.9	26.9

عملیات زراعی

زمین مورد کاشت در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ زیر کشت گندم بود. به منظور آماده‌سازی زمین مورد مطالعه، شخم با استفاده از گاوآهن برگردان دار در خرداد ماه انجام شد. عملیات ثانویه به صورت دو دیسک عمود بر هم انجام و تسطیح زمین با ماله انجام شد. کاشت در هر دو سال زراعی در تاریخ‌های ۱۵ بهمن ماه، ۳۰ بهمن ماه و ۱۵ اسفند به‌صورت دستی انجام شد. علف‌های هرز نیز به شکل دستی وجین شدند. در هنگام رسیدگی فیزیولوژیک و رسیدن رطوبت دانه‌ها به ۱۴ درصد برداشت صورت گرفت. با توجه به عرف منطقه مقدار ۲۰۰ کیلوگرم کود اوره، ۱۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۱۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل به صورت پیش کاشت در مزرعه اعمال شد.

طرح آزمایشی

آزمایش به صورت اسپلیت- اسپلیت پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ۷۲ کرت در هر سال اجرا شد. عامل اصلی شامل تاریخ کاشت در ۳ تاریخ ۱۵ بهمن ماه، ۳۰ بهمن ماه و ۱۵ اسفند ماه بود. عامل فرعی شامل پرولین در ۲ سطح عدم مصرف و مصرف (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. عامل فرعی فرعی شامل نانو ذرات آهن در چهار سطح عدم مصرف، مصرف ۰/۳ گرم، مصرف ۰/۶ گرم و مصرف ۰/۹ گرم بود. هر تکرار ۴ متر عرض و ۸۴ متر طول داشت. فاصله بین بلوک‌ها ۳ متر در نظر گرفته شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۵۰ سانتی‌متر و روی ردیف نیز ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

در این تحقیق از نانو ذارت اکسید آهن (Fe_3O_4) عامل دار با خلوص ۹۸ درصد (کربوکسیل COOH، هیدروکسیل OH و آمین NH_2) تهیه شده از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان استفاده شد. تیمار محلول‌پاشی پرولین از شرکت مرک با درصد خلوص ۳۵ درصد به شکل پودر (محلول در آب) در عصر و در هوای ملایم و صاف، با استفاده از سمپاش دستی اعمال گردید؛

به‌طوری‌که برگ‌های گیاه کاملاً خیس شـــده و به‌منظور بهبود جذب برگی پرولین، از تریتون X100 با غلظت ۰/۰۱ درصـــد (Arab *et al*., 2017) اســـتفاده شـــد. در زمان ســـاقه رفتن، گل‌دهی و قبل از رســـیدگی محلول‌پاشـــی آهن و پرولین در ۳ قسط مساوی برای هر تیمار انجام شد.

نمونه‌برداری

پس از انجام آزمایش صـــفات ارتفاع بوته، تعداد شـــاخه گل‌دهنده، ارتفاع شاخه اصلی گل‌دهنده، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شـاخص برداشـت، ماده خشـک سـاقه، ماده خشک گل‌دهی، ماده خشک دانه بستن به روش ارائه شده انجام گردید.

با حذف ۵ بوته از ابتدا و بوته از انتها دو خط کشـــت میانی در کرت به طور تصـادفی ۱۰ بوته انتخاب گردید و ارتفاع گیاه با اسـتفاده از متر اندازه‌گیری شـد و میانگین آن‌ها به عنوان ارتفاع گیاه در آن کرت در نظر گرفته شـد. با حذف ۵ بوته از ابتدا و ۵ بوته از انتهای دو خط کشت میانی در کرت به طور تصادفی ۱۰ بوته انتخاب گردید و تعداد شاخه گل دهنده اندازه‌گیری شد. از دو خط میانی با حذف حاشـــیه‌ها ۵۰۰ دانه به طور تصـــادفی با اســـتفاده از ترازوی دیجیتـال وزن گردیده و به وزن هزاردانه تعمیم داده شـــد. از دو خط میانی با حذف حاشـــیه‌ها به طور تصـــادفی ۱۰ بوته انتخاب گردید و عملکرد دانه در مترمربع محاسـبه گردید و به هکتار تعمیم داده شد. برای تعیین عملکرد بیولوژیک از هر کرت ۱۰ بوته به طور تصـادفی انتخاب گردید و پس از خشـک شـدن با ترازوی دقیق وزن گردید و میانگین به هکتار تعمیم داده شـد. از تقسـیم عملکرد اقتصـادی بر عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت به صورت درصد به‌دست آمد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

قبل از تحلیل آماری و تجزیه واریانس، آزمون توزیع نرمال داده‌ها و خطاها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد و هم‌چنین قبـل از انجـام تجزیـه واریـانس مرکـب آزمون همگنی واریـانس خطاهای آزمایشـی انجام شـد که حاکی از مناسـب بودن داده‌ها برای تجزیه بود. سـپس داده‌های دو سـال با اسـتفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹ تجزیه مرکب و مقایسـه میانگین و رسـم گراف‌ها با اســتفاده از Excel انجام گرفت. از آزمون دانکن در ســطح ۵ درصد برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

علاوه بر اثرات اصـــلی، اثر متقابل نانوذرات آهن و پرولین و اثر متقابل تاریخ کاشت و پرولین در سطح ۱ درصد و اثر متقابل تاریخ کاشـت و نانوذرات آهن در سـطح ۵ درصـد بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۳). در خصـوص اثر متقابل نانوذرات آهن و پرولین بیشـــترین ارتفاع بوته با ۹۵/۱۸ ســـانتی‌متر و مربوط به مصـرف آهن ۰/۹ گرم و مصـرف پرولین و کمترین ارتفاع بوته با ۷۰/۸ سانتی‌متر و مربوط به عدم مصـرف پرولین و عدم مصـرف نانو ذرات آهن بود. در تمام سطوح مصرف نانوذرات آهن، مصرف پرولین منجر به افزایش ارتفاع بوته شـد (جدول ۴). در خصـوص اثر متقابل تاریخ کاشـــت و پرولین، بیشـــترین ارتفاع بوته با ۱۱۲/۲۴ ســـانتی‌متر مربوط مصـــرف پرولین و تاریخ کاشـــت پانزدهم اســـفند ماه و هم‌چنین کمترین میزان ارتفاع بوته با ۵۵/۵۹ ســـانتی‌متر مربوط به تاریخ کاشـت پانزدهم بهمن ماه با عدم مصـــرف پرولین بود. در تمام تاریخ‌های کاشـــت مصـــرف پرولین موجب افزایش ارتفاع بوته شـــد، به‌طوری‌که در تاریخ کاشـت ۱۵ اسـفند بین مصـرف و عدم مصـرف پرولین اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵).

در خصـــوص اثر متقابل تاریخ کاشـــت و نانوذرات آهن، بیشـــترین ارتفاع بوته با ۱۲۲/۸ ســـانتی‌متر مربوط مصـرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و هم‌چنین کمترین میزان ارتفاع بوته با ۴۶/۹ ســـانتی‌متر مربوط به تاریخ کاشـت پانزدهم بهمن ماه با عدم مصـرف نانوذرات آهن بود. در تمام تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین موجب افزایش ارتفاع بوته شـد، به‌طوری‌که در تاریخ کاشـت ۱۵ اسـفند بین مصـرف و عدم مصـرف پرولین اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشـت (جدول ۶).

پرولین به عنوان یک اسـمولیت سـازگار کننده نقش مهمی در تنظیم اسمزی درون سلولی، پایدار کردن ساختار پروتئین‌ها و غشاء سلولی، جاروب کردن گونه‌های اکسیژن رادیکال، تنظیم pH سـلولی واکنش‌های اکسـیداسـیون و احیا، ایفا می‌کند. در تاریخ کاشت سوم با توجه به گرم شدن هوا و افزایش دما میزان تنش خشـکی بیشـتر گردید و مصـرف پرولین باعث تعدیل در

تنش خشـــکی شـــد که منجر به افزایش ارتفاع بوته گردید (Abuggadare *et al*., 2009). محققـان (Karima *et al*., 2005) در آزمایشـــی دریافتند که محلول‌پاشـــی نانوذرات باعث افزایش قابل توجه ارتفاع بوته، می‌شـود. این محققان بیان کردند که نانو کلات آهن در مقایسه با شکل معمول آن تأثیر بیشـتری بر ارتفاع بوته و رشـــد گیاه ریحان نشـــان داد که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تاریخ کاشت، نانوذرات آهن و پرولین بر عملکرد و صفات مرتبط با آن

Table 3- Analysis of variance of the effect of planting date, iron and proline nanoparticles on yield and related traits

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی DF	ارتفاع بوته Height	تعداد شاخه گل دهنده of Number flowering branches	ارتفاع شاخه اصلی گلدهنده the of height flowering main branch	وزن هزار دانه 1000 seeds weight	عملکرد دانه yield Seed	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index
سال Year (Y)	1	282.8**	167.2**	455.4**	0.39**	678976.1**	119255.1*	222.5**
تکرار(سال) Rep (Y)	4	895.1**	17.21**	211.2**	5.72**	3067927.1**	2103075**	573.7**
تاریخ کاشت Planting data (P)	2	33454**	2831**	7319.4**	76.7**	8914061.2**	16427782 **	682.1**
سال×نانو آهن Y*P	2	217.7**	229.5**	123.7**	1.98**	314522.4**	1258536^{ns}	187.33**
خطای اصلی Residual	8	80.083	6.36	11.62	1.05	271387.3	1069167.2	165.38
نانو آهن Iron (I)	3	3074**	276.5**	629.2**	6.38**	456582.9**	533577**	54.39**
سال×نانو آهن Y*I	3	8.22^{ns}	6.62**	4.26**	0.02^{ns}	28978.6*	17041.1^{ns}	2.94*
تاریخ کاشت×نانو آهن P*I	6	24.18**	15.73**	14.38**	0.19**	52055.3**	24730.2^{ns}	7.62**
سال×تاریخ کاشت×نانو آهن Y*P*F	6	4.67^{ns}	7.83**	3.30**	0.20**	29746.2**	14704.2^{ns}	9.14**
خطای فرعی Ra	36	17.49	0.34	1.39	0.05	14846.6	292241	2.88
پرولین Prolin (Pr)	1	294.1**	51.3**	105.5**	1.15**	196396.6**	235710**	21.48**
سال×پرولین Y*Pr	1	10.56^{ns}	1.48**	1.38^{ns}	0.006^{ns}	8070.1^{ns}	42.25^{ns}	1.50^{ns}
تاریخ کاشت×پرولین P*Pe	2	36.14**	3.96**	2.70**	0.06**	30581.1*	11718.4^{ns}	3.76*
سال×تاریخ کاشت×پرولین Y*P*Pr	2	21.89**	0.16^{ns}	0.34^{ns}	0.01^{ns}	19405.4^{ns}	18972.7^{ns}	3.87*
نانو آهن×پرولین I*Pr	3	17.61*	0.25^{ns}	0.17^{ns}	0.013^{ns}	27676.9*	32250.2^{ns}	2.20^{ns}
سال×نانو آهن×پرولین Y*I*Pr	3	17.73*	2.25**	0.11ns	0.024^{ns}	17626.1^{ns}	13236.2^{ns}	3.50*
تاریخ کاشت× نانوآهن×پرولین P*I*Pr	6	10.57^{ns}	0.44*	0.87^{ns}	0.030*	43256.5**	45667.1*	4.47**
سال×تاریخ کاشت×نانوآهن×پرولین Y*P*I*P	6	23.54**	1.43**	0.56^{ns}	0.007^{ns}	10096.3^{ns}	11555.1^{ns}	2.83*
خطای کل R Totall	48	6.49	0.24	0.42	0.011	8563.21	19917.3	0.98
ضریب تغییرات CV	-	3.04	2.77	2.63	2.90	4.57	3.16	2.20

^{ns}، ** و * به ترتیب غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک و ۵٪ می‌باشند.

^{ns}, ** and * and are non-significant and significant at the probability level of one and 5%, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل نانوذرات آهن و پرولین بر ارتفاع بوته و عملکرد دانه

Table 4- Comparison of the mean of three interactions Iron and proline nanoparticles on plant height and seed yield

محلول پاشی پرولین Proline foliar application	محلول پاشی نانو آهن Nano-iron foliar application (g Litr^{-1})	ارتفاع Height (cm)	عملکرد Seed yield (kg ha^{-1})
0	0	70.80^{g}	1858.7^{f}
	0.3	78.53^{e}	1970.4^{de}
	0.6	84.88^{c}	2029.4^{bc}
	0.9	94.17^{a}	2091.1^{ab}
۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر 100 mg Litr $^{-1}$	0	75.21^{f}	1939.8^{ef}
	0.3	81.42^{d}	1999.4^{cde}
	0.6	88.01^{b}	2062.1^{bc}
	0.9	95.18^{a}	2238.1^{a}

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5٪

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل تاریخ کاشت و پرولین بر ارتفاع بوته، ارتفاع شاخه گلدهنده و عملکرد دانه

Table 5- Comparison of mean interaction effects of planting date and proline on plant height, flowering branch height and seed yield

تاریخ کاشت Planting date	محلول پاشی پرولین Proline foliar application (mg Litr $^{-1}$)	ارتفاع بوته Height (cm)	ارتفاع شاخه گلدهنده main the of Height branch flowering	عملکرد دانه Seed yield (kg ha^{-1})
۱۵ بهمن 4 February	0	55.59^{e}	12.30^{f}	1637.5^{e}
	100	59.29^{d}	13.54^{e}	1673.1^{e}
۳۰ بهمن 19 February	0	82.47^{c}	23.12^{d}	1888.8^{d}
	100	83.33^{c}	24.85^{c}	1943.7^{c}
۱۵ اسفند 4 March	0	108.23^{b}	36.48^{b}	2431.6^{b}
	100	112.24^{a}	38.67^{a}	2562.7^{a}

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5٪

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل تاریخ کاشت و نانوآهن بر ارتفاع بوته و ارتفاع شاخه گلدهنده

Table 6- Comparison of mean interaction effects of planting date and iron nanoparticles on plant height and flowering branch height

تاریخ کاشت Planting date	محلول پاشی نانو آهن Nano-iron foliar application (g Litr^{-1})	ارتفاع بوته Height (cm)	ارتفاع شاخه گلدهنده main the of Height branch flowering
۱۵ بهمن 4 February	0	47.0 ^{l}	9.01 ^{g}
	0.3	54.5 ^{k}	12.2 ^{fg}
	0.6	60.9 ^{g}	14.2 ^{f}
	0.9	67.5 ^{i}	16.2 ^{ef}
۳۰ بهمن 19 February	0	73.9 ^{h}	18.8 ^{e}
	0.3	79.6 ^{g}	22.2 ^{de}
	0.6	84.4 ^{f}	25.5 ^{d}
	0.9	93.7 ^{b}	29.3 ^{c}
۱۵ اسفند 4 March	0	98.2 ^{d}	32.1 ^{bc}
	0.3	105.9 ^{c}	35.3 ^{b}
	0.6	114.1 ^{b}	38.9 ^{ab}
	0.9	122.8 ^{a}	43.8 ^{a}

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5٪

تعداد شاخه گل‌دهنده

علاوه بر معنی‌دار بودن اثرات اصلی (در سطح ۱ درصد) و اثرات متقابل دو گانه (در سطح ۱ درصد)، اثر متقابل نانوذرات آهن، نانوذرات پرولین و تاریخ کاشت نیز در سطح ۵ درصد بر تعداد شاخه گل‌دهنده در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه، مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانو ذرات آهن بیشترین تعداد شاخه گل‌دهنده به‌تعداد ۳۱/۴ عدد و کمترین تعداد شاخه گل‌دهنده مربوط به تاریخ کشت پانزدهم بهمن ماه و عدم مصرف پرولین و نانو ذرات آهن به‌تعداد ۶/۶۶ عدد حاصل گردید. در تمامی تاریخ‌های کاشت همواره بیشترین تعداد شاخه گل‌دهنده با مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن حاصل شد (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل تاریخ کاشت، نانو ذرات آهن و پرولین بر برخی صفات

Table 7- Comparison of the mean interaction of planting date, iron nanoparticles and proline on some traits

تاریخ کاشت Planting date	محلول پاشی نانو آهن Nano-iron foliar application (g Litr^{-1})	محلول پاشی پرولین Proline foliar application (mg Litr^{-1})	تعداد شاخه گل دهنده Number of flowering branches	وزن هزار دانه 1000-seed weight (g)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biologic yield (kg ha^{-1})	شاخص برداشت HI (%)
۱۵ اسفند 4 March	0	0	6.66 t	1.85 s	1531.2 hjg	3688 fg	41.59 g
		100	14.75 n	3.36 m	1724.7 gh	4222.5 ef	40.66 h
	0.3	0	20.46 h	4.38 g	2303.2 e	4887.5 bc	46.92 d
		100	8.19 s	2.04 r	1562.2 j	3729 h	45.39 de
	0.6	0	15.26 m	3.49 l	1898.3 f	4458.5 de	42.51 g
		100	22.2 g	4.53 f	2358.8 de	4932.3 ab	47.66 cd
	0.9	0	9.05 r	2.28 q	1599.7 ij	3793.3 h	42.6 f
		100	15.86 m	3.61 k	1911.2 f	4478.2 de	42.61 g
۳۰ بهمن 19 February	0	0	23.85 f	4.67 e	2400.5 cde	4953.5 ab	48.27 c
		100	11.26 q	2.47 p	1640.8 hij	3849.5 gh	42.86 f
	0.3	0	16.51 l	3.73 j	1925.3 f	4482.5 de	42.85 fg
		100	25.18 e	4.8 d	2432.2 bcd	4973.7 ab	48.69 bc
	0.6	0	11.06 q	2.57 op	1671 g-j	3886.2 fgh	43.21 ef
		100	17.01 k	3.82 j	1944.7 f	4520.3 de	42.94 fg
	0.9	0	26.68 d	4.96 c	2472.5 bc	4992.5 ab	49.29 b
		100	12.15 p	2.61 p	1714.7 ghi	3930.2 fgh	43.85 ef
۱۵ بهمن 4 February	0	0	17.45 k	3.93 ij	1959.8 f	4543.7 de	43.06 f
		100	28.33 c	5.34 b	2511.7 bc	5020.5 ab	49.77 ab
	0.3	0	13.2 o	2.9 o	1748.2 gh	3978.2 fgh	44.13 e
		100	18.88 j	4.06 h	1974.8 f	4569.3 d	43.15 ef
	0.6	0	29.71 b	5.48 b	2550.6 b	5054.3 ab	50.17 ab
		100	14.11 n	3.09 n	1774.8 g	4044.8 fgh	44.06e
	0.9	0	19.43 i	4.2 h	1991.3 f	4591.7 cd	43.31 ef
		100	31.43 a	5.87 a	2948.2 a	5424.5 a	54.13 a

ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف آماری معناداری توسط آزمون LSD در سطح ۵ درصد ندارند

Columns with common letters do not have a statistically significant difference by LSD test at the level of 5٪

محققان (Eskandari *et al*., 2013) پژوهشی روی گیاه مرزه انجام دادند و گزارش کردند که مصرف عناصر کم مصرف آهن و روی فعالیت فتو سنتزی گیاه افزایش یافت و باعث توسعه پوشش گیاهی و افزایش شاخ و برگ می‌شود (Lavini *et al*., 2014). تنش کم آبی سبب افزایش غلظت آهن و روی در اندام‌های گیاه می شود و باعث تنظیم اسمزی از طریق انباشت کربوهیدرات‌ها و انباشت اسیدهای آمینه ضروری پرولین می‌گردد که باعث توسعه اندام‌های گیاهی و افزایش تعداد شاخه گل‌دهنده می‌شود (Lavini *et al*., 2014).

ارتفاع شاخه اصلی گل‌دهنده

نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌دار بودن اثرات اصلی (در

سطح ۱ درصد)، اثر متقابل تاریخ کاشت و نانوذرات آهن، و اثر متقابل تاریخ کاشت و نانوذرات پرولین نیز بر ارتفاع شاخه اصلی گل‌دهنده در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین ارتفاع شاخه گل‌دهنده با ۳۸/۶۷ سانتی‌متر مربوط مصرف پرولین و تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و هم‌چنین کمترین میزان ارتفاع شاخه گل‌دهنده با ۱۲/۳ سانتی‌متر مربوط به تاریخ کاشت پانزدهم بهمن ماه با عدم مصرف پرولین بود. در تمام تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین موجب افزایش ارتفاع شاخه گل‌دهنده شد، به‌طوری‌که در تمامی تاریخ‌های کاشت بین مصرف و عدم مصرف پرولین اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵). مصرف نانو ذرات آهن در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه باعث افزایش تعداد شاخه اصلی گل‌دهنده (۴۳/۸ سانتی‌متر) نسبت به شاهد (۳۲/۱۶سانتی‌متر) در همان تاریخ کاشت و هم‌چنین افزایش چشم‌گیری نسبت به عدم مصرف نانو ذرات آهن در تاریخ کاشت پانزده هم بهمن ماه (۹/۰۱ سانتی‌متر) گردید (جدول ۶). انباشت پرولین نقش بسیار مؤثری در تطابق و سازگاری گیاه با شرایط خشکی ناشی از تاریخ کاشت دیر هنگام دارد که این تطابق باعث افزایش ارتفاع بوته و طبیعتاً افزایش ارتفاع شاخه گل‌دهنده می‌شود که با نتایج این تحقیق هم‌سو است (Moghadam *et al*., 2015). افزایش غلظت اسید آمینه پرولین که به تنظیم اسمزی کمک می‌کند، ناشی از چند عامل گزارش شده است از جمله: ممانعت از تجزیه پرولین، جلوگیری از ورود پرولین به پروتئین و کاهش رشد و عملکرد گیاهان زراعی می‌شود (Lavini *et al*., 2014) که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد بطوری‌که بیشترین ارتفاع شاخه اصلی گل‌دهنده مربوط به تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف پرولین و همچنین کمترین ارتفاع شاخه اصلی گل دهنده مربوط به پانزدهم بهمن ماه و عدم مصرف پرولین می‌باشد. محققان (Moghadam *et al*., 2015) گزارش کردند که مصرف نانو کلات آهن روی شاخه‌های ریحان باعث افزایش دو برابری تعداد شاخه‌های فرعی نسبت به شاهد گردید که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

وزن هزار دانه

نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌دار بودن اثرات اصلی (در سطح ۱ درصد)، اثر متقابل دوگانه تاریخ کاشت و آهن و اثر متقابل تاریخ کاشت و پرولین (در سطح ۱ درصد)، اثر سه گانه نانوذرات آهن، نانوذرات پرولین و تاریخ کاشت نیز در سطح ۵ درصد بر وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین وزن هزار دانه در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانو ذرات آهن به‌مقدار ۵/۸۷ گرم به‌دست آمد و هم‌چنین کمترین وزن هزار دانه در تاریخ کشت پانزدهم بهمن ماه و عدم مصرف نانو ذرات آهن به‌مقدار ۱/۸۵ گرم به‌دست آمد. در تمامی تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش وزن هزار دانه شد (جدول ۷). مطالعات محققان (Monjezi *et al*., 2012) نشان داد که تأثیر محلول‌پاشی عنصر آهن بر روی عملکرد و اجزاء عملکرد گیاه گندم از طریق افزایش فتوسنتز و هم‌چنین انتقال محصول آن، یعنی قند به دانه‌ها و هم‌چنین افزایش سرعت انتقال مجدد مواد فتوسنتزی گیاه به دانه در مقایسه با تیمار شاهد، موجب افزایش وزن هزار دانه و عملکرد دانه گردید. در مطالعه‌ای (Hinojosa *et al*., 2019) دمای بالا باعث بهبود سرعت فتوسنتز گیاه کینوا در تاریخ‌های متفات کشت شد.

عملکرد دانه

نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌دار بودن اثرات اصلی (در سطح ۱ درصد)، اثر متقابل تاریخ کاشت و آهن (در سطح ۱ درصد)، اثر متقابل تاریخ کاشت و پرولین (در سطح ۵ درصد) و اثر متقابل نانو آهن و پرولین (در سطح ۵ درصد)، اثر سه گانه نانوذرات آهن، نانوذرات پرولین و تاریخ کاشت نیز بر عملکرد دانه در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین عملکرد دانه با میزان ۲۲۳۸/۱ کیلوگرم در هکتار در تیمار ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین و هم‌چنین کمترین مقدار عملکرد دانه با میزان ۱۸۵۸/۷ کیلوگرم در هکتار در تیمار عدم مصرف پرولین و عدم مصرف نانو ذرات آهن به‌دست آمد. در تمامی تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش عملکرد دانه شد (جدول ۷). محققان (Monjezi *et al*., 2012) گزارش کردند که استفاده از نانو کودهای آهن باعث افزایش متابولیسم گیاهان و جذب بیشتر و موثرتر عناصر و کودهای اصلی و هم‌چنین رساندن هدف‌مند عناصر ریزمغذی به بافت‌های مشخص گیاهان می‌باشد. آهن نقش مهمی در سنتز کلروفیل دارد زیرا از اجزای اصلی کلروفیل، تنظیم کننده تنفس و فتوسنتز و کاهش دهنده

نیترات و سولفات است که نانو ذرات آهن و روی بطور چشم‌گیر باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گردید که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد. پژوهشگران (Roosta *et al.*, 2015) اظهار داشتند که یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو، استفاده از نانو کودها جهت تغذیه گیاهان است. نانو کودها با رهاسازی تدریجی و آرام عناصر غذایی بهترین جایگزین برای کودهای مرسوم هستند. با بهره‌گیری از نانو کودها، عناصر غذایی به آرامی و با سرعتی مناسب در تمام فصل رشد گیاه آزاد می‌شود و به دلیل کاهش آبشویی، گیاهان قادر به جذب بیشتر عناصر خواهند بود که منجر به افزایش عملکرد و اجرای عملکرد می‌گردد که با نتایج این تحقیق هم‌سو می‌باشد. پژوهشگران (Pandey *et al.*, 2010) بیان کردند که محلول‌پاشی یا تغذیه برگی یکی از راه‌های مؤثر در رفع نیاز گیاهان به عناصر کم‌مصرف است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

عملکرد بیولوژیک

نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌دار بودن اثرات اصلی (در سطح ۱ درصد)، اثر سه گانه نانوذرات آهن، نانوذرات پرولین و تاریخ کاشت نیز بر عملکرد بیولوژیک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیک در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین (۵۴۲۴/۵کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد و کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک در تاریخ کاشت پانزدهم بهمن ماه بدون مصرف نانوذرات آهن و عدم مصرف پرولین (۳۶۸۸ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. در تمامی تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش عملکرد بیولوژیک شد (جدول ۷).

محققان (Roosta *et al.*, 2015) بیان کردند که هنگامی که کودی در خاک استفاده می‌شود، به دلایلی نظیر آبشویی، پیوند با سایر عناصر در خاک و نقش میکروارگانیسم‌ها (Dolatshah *et al.*, 2020)، ممکن است قسمت یا تمامی آن از دسترس گیاه خارج گردد، لذا محلول‌پاشی برخی عناصر ریزمغذی می‌تواند باعث عبور آن‌ها از موانع فیزیکی و شیمیایی مختلف و افزایش عملکرد بیولوژیکی و اقتصادی در گیاه می‌شود. آهن در فرایند فتوسنتز و تولید کربو هیدرات‌ها دخللت دارد، بنابراین نقش این عناصر را می‌توان در کمک به تنظیم اسمزی دانست که با دخالت در سنتز آسمولیت‌ها برای سازگاری با تنش و حفظ فشار تورژسانس نقش خود را اجرا می‌کنند.

شاخص برداشت

نتایج نشان داد که علاوه بر معنی‌دار بودن اثرات اصلی (در سطح ۱ درصد)، اثر متقابل تاریخ کاشت و آهن (در سطح ۵ درصد) و اثر متقابل نانو آهن و پرولین (در سطح ۵ درصد)، اثر سه گانه نانوذرات آهن، نانوذرات پرولین و تاریخ کاشت نیز بر شاخص برداشت در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین مقدار شاخص برداشت در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین (۵۴/۱۳ درصد) به‌دست آمد و کمترین مقدار شاخص برداشت در تاریخ کاشت سی‌ام بهمن ماه، و عدم مصرف نانوذرات آهن و پرولین (۴۰/۶۶ درصد) به‌دست آمد. در تمامی تاریخ‌های کاشت مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش شاخص برداشت شد (جدول ۷).

پژوهشگران (Pandey *et al.*, 2010) اظهار داشتند که اسید آمینه و نانو ذرات آهن هر دو سبب افزایش سطح برگ و افزایش فتوسنتز می‌شوند، بنابراین زمانی که آهن به صورت محلول‌پاشی برگی به گیاه منتقل می‌شود، میزان ساخت کلروفیل در گیاه افزایش می‌یابد، و به‌دنبال آن عملکرد دانه و شاخص برداشت افزایش می‌یابد. محققان (Thomas *et al.*, 2009) گزارش کردند که مصرف پرولین موجب افزایش شاخص برداشت می‌گردد که با نتایج این تحقیق هم‌سو است.

نتیجه‌گیری کلی

وزن هزار دانه در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانو ذرات آهن به‌مقدار ۵/۸۷ گرم به‌دست آمد که حدود ۲/۳ برابر بیشتر از وزن هزار دانه در تاریخ کشت پانزدهم بهمن ماه و عدم مصرف نانو ذرات آهن بود. بیشترین عملکرد دانه با میزان۲۲۳۸/۱ کیلوگرم در هکتار در تیمار ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین حاصل شد که ۲۹ درصد بیشتر از کمترین مقدار عملکرد دانه در تیمار عدم مصرف پرولین و عدم مصرف نانو ذرات آهن بود.

بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیک در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین (۵۴۲۴/۵ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد که ۳۸ درصد بیشتر از عملکرد بیولوژیک در تاریخ کاشت پانزدهم بهمن ماه، بدون مصرف نانوذرات آهن و عدم مصرف پرولین بود. بیشترین مقدار شاخص برداشت در تاریخ کاشت پانزدهم اسفند ماه و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن و مصرف پرولین (۵۴/۱۳ درصد) به‌دست

آمد و ۲۸ درصد بیشتر از شاخص برداشت در تاریخ کاشت سی‌ام بهمن ماه، و عدم مصرف نانوذرات آهن و پرولین بود. به‌طور کلی در تمامی تاریخ‌های کاشت، مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش تعداد شاخه گل‌دهنده و وزن هزار دانه به‌عنوان اجزاء اصلی عملکرد دانه شد که به دنبال آن عملکرد دانه و شاخص برداشت افزایش یافت. هم‌چنین در تمامی تاریخ‌های کاشت، مصرف پرولین و مصرف ۰/۹ گرم نانوذرات آهن موجب افزایش ارتفاع بوته شد و از طرفی با توجه به آن‌که ارتفاع بوته بر عملکرد بیولوژیک تأثیرگذار است، این ترکیب تیماری موجب افزایش عملکرد ماده خشک گیاه شد.

باتوجه به نتایج به‌دست آمده تاریخ کشت پانزدهم اسفند، مصرف پرولین و تیمار ۰/۹ گرم نانوذرات آهن برای حصول تولید دانه بالا در شرایط کشت منطقه توصیه می‌گردد.

References

Vidueiros, S.M., Curti, R.N., Dyner, L.M., Binaghi, M.J., Peterson, G., Bertero, H.D. and Pallaro, A.N., 2015. Diversity and interrelationships in nutritional traits in cultivated quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Northwest Argentina'. *Journal of Cereal Science*, *62*(1), pp.87-93. **doi: 10.1016/j.jcs.2015.01.001.**

Abkat, A., Nabizadeh, A. and Roshdi, M., 2020. Investigation of agronomic characteristics and yield of *Dracocephalum moldavica* L. Nitrogen consumption levels and trace elements. *Journal of Plant Ecophysiology*, *12*(41), pp.108-119. **dor: 10.30495/jcep.2020.671176**

Abuggadare, L., Castro, E., Tapia, C., Añón, M.C., Gajardo, P. and Villarroel. A., 2009. Stability of quinoa flour proteins *(Chenopodium quinoa* Willd.) during storage. *International Journal of Food Science & Technology*, *44*(10), pp.2013-2020. **doi: 10.1111/j.1365-2621.2009.02023.x.**

Ahmadi, F., Pasari, B. and Jewelry, M., 2020. Investigation of the reaction of corn (*Zea mays* L.) under the influence of various chemical, nano, nanobiological and organic extracts of seaweed. *Journal of Plant Ecophysiology*, *12*(41), pp.188-203. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.20085958.1399.12.41.16.3.**

Arab, S., Firoozabadi, M., Gholami, A., Asghari, H.R. and Rahimi, M., 2017. Effect of ascorbic acid and sodium nitroposide associating on protein content, grain yield and some traits of safflower under irrigation stress. *Journal of Crop Production*, *9*(1), pp.69-87. [In Persian]. **doi: 10.22069/ejcp.2016.2957.**

Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Behashti, S., 2021. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and nutrient efficiency indices in maize under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *14*(3), pp.675-690. [In Persian]. **doi: 10.22077/escs.2020.3095.1793.**

Bahamin, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Beheshti, S., 2019. Effect of biological and chemical fertilizers of nitrogen and phosphorus on quantitative and qualitative productivity of maize under drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *12*(1), pp.123-139. [In Persian]. **doi: 10.22077/escs.2018.1152.1235.**

Dolatshah, M., Hassani Moghadam, A., Shaban, M. and Yarahmadi, R., 2020. The effect of foliar application of iron and zinc on volatile compounds of Lemongrass (*Melissa officinalis* L.). *Journal of Plant Ecophysiology*, *12*(42), pp.116-130. [In Persian]. **dor: 10.1080/0972060x.2017.1325010.**

Ebrahimnia, R., Bijanzadeh, A., Behpoori, A. and Naderi, R., 2020. Changes in leaf chlorophyll content and protein and grain yield of three macaroni wheat cultivars *(Triticum durum*) due to the application of nano

fertilizers. *Journal of Plant Ecophysiology*, *12*(40), pp.152-165. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.20085958.1399.12.40.13.8.**

Esfandiarfateh, A. and Ebrahimi, A., 2019. The effect of planting date and density on quantitative and qualitative yield of Pimpinella anisum. *Journal of Plant Ecophysiology*, *11*(37), pp.178-190. [In Persian]. **dor: 20.1001.1.20085958.1398.11.37.17.9.**

Eskandari, M., 2013. Growth parameters and changes in the percentage of essential oil of Satureja bachtiarica Bunge under the influence of 28-hemobrasinolide and drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, *29*(1), pp.176-186. [In Persian]. **doi: 10.22092/ijmapr.2013.2899.**

Fallah, A.A., Marefpourian, Kh., Tadaion, S., Dehghani, F. and Zare, A., 2021. The effect of foliar application of ferrous sulfate and zinc sulfate on yield and yield components of rapeseed in Marvdasht region. *Journal of Plant Ecophysiology*, *13*(44), pp.1-12. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.20085958.1400.13.44.1.1**.

Fathi, A. and Kardoni, F., 2020. The importance of quinoa (*Chenopodium Quinoa* willd.) cultivation in developing countries: A review. *Cercetari Agronomice în Moldova*, *3*(183), pp.337-356. **doi: 10.30495/jcep.2022.1928721.1797.**

Fathi, A. and Bahamin, S., 2018. The effect of irrigation levels and foliar application (zinc, humic acid and salicylic acid) on growth characteristics, yield and yield components of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *11*(3), pp.661-674. [In Persian]. **doi: 10.22077/escs.2017.720.1146.**

Foladvand, F., Khoshkhabar, H., Naghdi, N., Hosseinabadi, M., Bahamin, S. and Fathi, A., 2017. The effect of sowing date and nitrogen on yield, and essential oil of German chamomile. *Scientia Agriculturae*, *19*(3), pp.85-92. **doi: 10.3390/agronomy12122912**.

Hinojosa, L., Matanguihan, J.B. and Murphy, K.M., 2019. Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Agronomy Crop Science*, *205*, pp.33-45. **doi: 10.22067/jag.v13i3.83543.**

Jamali, S., 2017. Investigation of the effect of different levels of salinity and irrigation on yield and yield components of quinoa. Master Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, *3*, pp.22-30. [In Persian]. **doi: 10.22069/jwsc.2018.13721.2841.**

Jamali, S., Sharifan, H., Hezargaribi, A. and Sepahvand, N.A., 2016. The effect of different salinity levels on germination and growth indices of two cultivars of *Chenopodium quinoa* willd. *Scientific and Research Journal of Water and Soil Resources Protection*, *6*(1), pp.98-87. [In Persian]. **doi: 10.22092/jwra.2021.355073.877.**

Javadi, H., 2019. The effect of drought stress and foliar application of iron and zinc on yield and yield components of sunflower in the second crop. *Journal of Plant Ecophysiology*, *11*(39), pp.1-11. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.20085958.1398.11.39.1.7.**

Javadi, H. and Zamani, Kh., 2019. Effect of planting date on yield, yield components and oil content of different safflower cultivars (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Plant Ecophysiology*, *11*(37), pp.1-12. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.20085958.1398.11.37.1.3.**

Kardoni, F., Bahamin, S., Khalil Tahmasebi, B., Ghavim-Sadati, S. and Vahdani, S., 2019. Yield comparisons of

mung-bean as affected by its different nutritions (chemical, biological and integration) under tillage systems. *Journal of Crop Ecophysiology*, *13*(49(1)), pp.87-102. [In Persian]. **doi: 10.30495/jcep.2019.664839.**

Karima, M., Eldin, N. and Abdel-wahed, M.S.A., 2005. Effect of some amino acids on growth and essential oil content of chamomile plant. *International of Journal of Agriculture and Biology*, *15*(3), pp.376-380**. dor: 10.1088/1755-1315/1060/1/012102.**

Lavini, A., Pulvento, C., Andria, R., Riccardi, M., Choukr-Allah, R., Belhabib, O., İncekaya, C., Metin Sezen, S., Qadir, M. and Jacobsen, S.E., 2014. Quinoa's potential in the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *200*, pp.344-360. **doi: 10.1111/jac.12069**.

Maleki, A., Fathi, A. and Bahamin, S., 2020. The effect of gibberellin hormone on yield, growth indices, and biochemical traits of corn (*Zea Mays* L.) under drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, *15*(59), pp.1-16. [In Persian]. **doi: 20.1001.1.76712424.1399.15.59.1.8.**

Moghaddam, A., Mahmoudi Sarestani, M., Farrokhian Firoozi, A., Ramezani, Z. and Eskandari, F., 2015. The effect of foliar application of iron chelate and iron nanoclate on morphological traits and the amount of holy basil essential oil. *Journal of Crops Improvement*, *17*(3), pp.595-606. [In Persian]. **doi: 10.22059/jci.2015.54372.**

Monjezi, F., Vazin., M. and Hassanzadehdelouei, M., 2012. Effects of iron and zinc spray on yield and yield components of Wheat (*Triticum aestivum* L.) in drought stress. *Cercetări Agronomice în Moldova*, *5*(153), pp.23-32. **doi: 10.2478/v10298-012-0072-z.**

Pandey, A.C., Sanjay, S.S. and Yadav, R.S., 2010. Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum* L. *Journal of Experimental Nanoscience*, *5*, pp.488-497. **doi: 10.1155/2022/1892759.**

Roosta, H.R., Jalali, M. and Vakili Shahrbabaki, M.A., 2015. Effect of nano-chelate, Fe-Eddha and FeSO4 on vegetative growth, physiological parameters and some nutrient elements concentration of four varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L) in NFT system. *Journal of Plant Nutrition*, *38*(14), pp.2176-2184. **doi: 10.1080/01904167.2015.1043378.**

Shamsibeiranvand, Z., Sadeghi, Z., Khoshkhabar, H., Hosseinabadi, M. and Bahamin, S., 2017. Survey some physiological characteristics of medicinal plant *Scrophularia striata* Boiss in Ilam province. *Scientia Agriculturae*, *19*(3), pp.62-68. **doi: 10.15192/pscp.sa.2017.19.3.6268.**

Thomas, J., Mandal, A.K.A., Raj Kumar, R. and Chordia, A., 2009. Role of biologically active amino acid formulations on quality and crop productivity of Tea (*Camellia* sp.). *International Journal of Agricultural Research, 4*, pp.228-236. **doi: 10.3923/ijar.2009.228.236.**

Zabet, M., Bahamin, S., Ghoreishi, S., Sadeghi, H. and Moosavi, S., 2015. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer on quantitative yield of aboveground part of forage pear millet (*Pennisetum glaucum*) in Birjand. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *7*(2), pp.187-194. [In Persian]. **doi: 10.22077/escs.2015.175.**

Journal of Crop Science Research in Arid Regions/ Volume 6, Issue 3, Autumn 2024, P. 91-104

Agrophysiological reaction of *Chenopodium quinoa* to foliar application of iron and proline nanoparticles at different culture dates

Rahmat Salehi[1], Abbas Maleki[1*], Mohammad Mirzaei Heidari[2], Alireza Rangin[3], Amir Mirzaei[4]

[1] Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Ilam Branch, Ilam, Iran
[2] Department of Production Engineering and Plant Genetics, Isfahan (Khorasgan) banch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
[3] Department of Biology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran
[4] Crop and Horticultural Science Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ilam, Iran
[*]Corresponding Author: maleki97@yahoo.com

Received: 29 April 2022 Accepted: 29 June 2022 **DOI: 10.22034/CSRAR.2024.339946.1229**

Abstract

Introduction: One of the benefits of agricultural research is the introduction of new and suitable plants for food production according to the agricultural conditions in the country. Quinoa consumption has become very common in countries around the world. On the other hand, climate change has made it necessary to pay attention to the planting date.

Materials and Methods: In order to investigate the possibility of ecophysiological compatibility of quinoa in different cultivation dates under the influence of foliar application of iron and proline nanoparticles on yield and related experimental traits in two consecutive years 2017-2018 and 2018-2019 in February in the farm of Sarableh Research Center in Ilam province as a split-split plot In the framework of the basic design, randomized complete blocks with three replications were implemented. The main factor included the planting date on 3 dates: 4th February, 19th February and 4th March. The secondary factor included proline in 2 levels of non-consumption and consumption. The sub-factor included iron nanoparticles in four levels of non-consumption, consumption of 3.0 grams, consumption of 6.0 grams and consumption of 9.0 grams. Before statistical analysis and analysis of variance, the test of normal distribution of data and errors was performed using SAS software and also before the combined analysis of variance, the homogeneity test of variance of experimental errors (Bartlett test) was performed. Then, two-year data were analyzed using SAS software version 9, combined analysis, and mean comparison and graph plots were performed using Excel. Duncan test was used to compare means.

Results and Discussion: The results showed that the interaction of iron nanoparticles and planting date on flowering branch height; The interaction effects of planting date, iron and proline nanoparticles on 1000-grain weight, grain yield, biological yield and harvest index were significant. On the 4th March planting date, proline consumption and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles, the highest number of flowering branches was obtained with 31.4. The highest 1000-seed weight was obtained on the 4th March planting date and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles in the amount of 5.87 g. In all planting dates, proline consumption and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles increased the weight of 1000 seeds and the number of flowering branches. The highest amount of biological yield was obtained on the 4th March and the use of 0.9 g of iron nanoparticles and proline consumption (5424.5 kg ha^{-1}) and the lowest amount of biological yield was obtained on the 4th February without iron nanoparticles and no proline (3688 kg ha^{-1}) was obtained. In all planting dates, proline consumption and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles increased biological yield. The highest grain yield with a rate of 2238.1 kg ha^{-1} was obtained in the treatment of 0.9 g of iron nanoparticles and proline consumption and also the lowest grain yield with a rate of 1858.7 kg ha^{-1} was obtained in the treatment of no proline consumption and no consumption of iron nanoparticles.

In all planting dates, proline consumption and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles increased seed yield.
Conclusion: In general, in all planting dates, proline consumption and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles increased the number of flowering branches and 1000-seed weight as the main components of grain yield, which was followed by grain yield and harvest index. Also, in all planting dates, proline consumption and consumption of 0.9 g of iron nanoparticles increased plant height and on the other hand, due to the fact that plant height has a transient effect on biological yield, this treatment combination increased plant dry matter yield. According to the obtained results, the date of cultivation is 4th March, the use of proline and treatment of 0.9 g of iron nanoparticles to achieve high grain production in the region under cultivation conditions is recommended to slightly increase the yield components.

Keywords: Antioxidant enzymes, Ecophysiological compatibility, Micronutrients, Yield components, Yield