نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد هجدهم، شماره ۱(۶۹)، بهار ۱۴۰۳، صفحه ۷۶-۵۷

مقاله پژوهشی DOI:

اثر تنش خشکی بر فعالیت بیوشیمایی و آنتی اکسیدانی ژنوتیپ‌های گندم تحت تیمارهای محلول‌پاشی مواد محرک رشد و نانوکلات روی

ریتا حبیبی[۱]، سوران شرفی[۲*]، سلیمان محمدی[۳]، تورج میرمحمودی[۴] و سامان یزدان‌ستا[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

چکیده

به‌منظور بررسی اثر تیمارهای مختلف محلول‌پاشی بر صفات بیوشیمیایی وآنتی اکسیدانی ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط مختلف رطوبتی، آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو مکان انجام شد. فاکتور اصلی آبیاری (نرمال و تنش کم آبی) و فاکتورهای فرعی چهار سطح محلول‌پاشی (شاهد-بدون محلول‌پاشی)، جاسمونیک اسید، نانو کلات روی و سوکسینات) و سه ژنوتیپ مختلف جو بودند. نتایج نشان داد تنش کم آبی محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کل را در مقایسه با شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب ۹/۰۳، ۶/۶۶ و ۷/۳۲ درصد کاهش و مقدار فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز را به‌ترتیب ۳/۲۹، ۳/۴۸ و ۵۰/۹۰ درصد افزایش داد. محلول‌پاشی نانوکلات روی مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کل و همچنین فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز را در مقایسه با شاهد به‌ترتیب ۱۵/۴۵، ۱۵/۷۶، ۱۴/۷۰، ۵۲/۶۳، ۱۱ و ۴۸/۱۴ درصد افزایش داد. رقم میهن بالاترین محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی و کمترین مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان را به خود اختصاص داد. نتایج نشان داد محلول‌پاشی نانو کلات محتوای پرولین، گلوتاتیون رودکتاز و عملکرد دانه را در مقایسه با تیمار شاهد در هر دو شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی افزایش داد. همچنین، محلول‌پاشی نانو کلات روی در رقم میهن توانست بالاترین عملکرد دانه و کمترین مقادیر پرولین، گلایسین بتائین و مالون‌دی‌آلدهید را تولید کند. در بین تیمارهای برهمکنش آبیاری با رقم، لاین ۹ بالاترین محتوی گلایسین بتائین در هر دو شرایط به خود اختصاص داد. می‌توان اظهار داشت محلول‌پاشی نانوکلات روی همراه با رقم مناسب می‌تواند راهکاری برای بهبود عملکرد دانه تحت شرایط مختلف محیطی باشد.

واژگان کلیدی: جاسمونیک اسید، سوکسینات، عناصر کم مصرف، کم‌آبی.

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

۲- استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

۳- دانشیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان‌غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، میاندوآب، ایران.

۴- دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

(نگارنده مسئول) sharafi_1352@yahoo.com

مقدمه

در بین غلات، بالاترین سهم تولید در جهان به گندم اختصاص دارد که سهم عمده‌ای در تغذیه انسان داشته و زراعت آن در مناطق خشک و نیمه خشک متداول بوده و کم‌آبی از مهم‌ترین محدودیت‌های زراعت این محصول است. ۱۹ درصد زراعت گندم به کشت دیم اختصاص دارد (Anonymous, 2019). آب مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید این گیاه است (Sun *et al*., 2006).

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل غیرزیستی است که تولید گیاهان زراعی را در سرتاسر دنیا تحت تأثیر قرار می‌دهد (Barati *et al*., 2015). از مهم‌ترین اثرات تنش کم‌آبی، تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) است که تجمع این مواد در گیاه باعث ایجاد تنش اکسیداتیو می‌شود. گیاهان به‌منظور حفاظت بافت‌ها از تنش اکسیداتیو، سازوکارهای آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و غیرآنتی اکسیدانی را فعال می‌کنند (Farooq *et al*., 2009).

در مقایسه تحمل یا مقاومت ژنوتیپ‌های گندم در شرایط مطلوب و تنش خشکی علاوه بر عملکرد دانه، اگر شاخص‌های مقاومت بر پایه خصوصیات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی نیز استوار گردد، می‌تواند به‌عنوان ابزار مهمی در پروژه‌های به نژادی گندم در انتخاب و غربال کردن لاین‌ها و توده‌های در حال تفکیک مورد استفاده قرار گیرد. گیاهان واکنش‌های مختلفی به شرایط نامساعد محیطی از خود نشان می‌دهند از جمله می‌توان به سنتز مواد آلی از جمله اسمولیت‌های سازگار اشاره کرد. این مواد (مانند گلایسین بتائین) وزن مولکولی کم دارای قابلیت انحلال بالایی بوده و در غلظت‌های بالا می‌توانند اثرات سمی داشته باشند (Ashraf and Foolad, 2007). از مهم‌ترین وظایف گلایسین بتائین در داخل سلول می‌توان به نقش آن به پایداری و استحکام ترکیبات پروتئنی موجود در غشای سلول اشاه کرد، این ترکیب همچنین با بهبود پایداری غشای سلولی می‌تواند دیواره سلولی را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی محافظت نماید (Savari *et al*., 2009).

جاسمونیک اسید به‌عنوان یک خانواده جدید از هورمون‌های گیاهی نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای رشد و نمو گیاه دارند (Norastehnia *et al*., 2007). جاسمونیک اسید یک مولکول پیام‌رسان در داخل سلول است و پاسخ‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی را در گیاه مواجه شده با تنش کنترل می‌کند. عوامل نامساعد محیطی مانند خشکی و شوری آب و خاک و همچنین تنش دمایی، میزان تجمع این ماده و بیان ژن‌های درگیر در سنتز این ماده را افزایش می‌دهند (Walia *et al*., 2007). تیمار با جاسمونات فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش و موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدی گردیده است (Aftab *et al*., 2011). یکی از مهم‌ترین اثرات تنش کم آبی اختلال در تعادل تغذیه‌ای و جذب عناصر مغذی در گیاه است، تأمین عناصر غذایی به کمک محلول‌پاشی می‌تواند تا حدی اثر نامناسب تنش کم‌آبی را بر رشد و نمو گیاهان تعدیل نماید. در شرایط تنش کم آبی محلول‌پاشی برگی عناصر غذایی می‌تواند راهکاری برای جبران کمبود عناصر غذایی باشد که تحت شرایط تنش کم آبی گیاه قادر به جذب آنها نیست.

برای جذب عناصر، ریشه‌ها اندام اولیه گیاه هستند که این نقش را به عهده دارند. وجود عاملی که دسترسی عناصر غذایی را در خاک محدود می‌کند، استفاده مورد انتظار از کودها را

کاهش می‌دهد. تحت این شرایط، عناصر غذایی برای گیاهان می‌تواند به‌وسیله استعمال برگی فراهم شود (Yadavi *et al*., 2014). شواهد موجود بیانگر ضرورت تأمین کافی عناصر معدنی جهت حفظ انتقال الکترون فتوسنتزی و متابولیسم کربن می‌باشد. لذا اختلال در تأمین آنها می‌تواند حساسیت گیاه را به‌ویژه در شرایط تنش‌زا تشدید نموده و تولید محصول در گیاه زراعی را هر چه بیشتر محدود کند. عنصر روی در تحمّل گیاهان زراعی به تنش‌های محیطی بیش از سایر عناصر دخالت دارد (Cakmak, 2008). با توجه به اینکه عنصر روی با فعالیت تعدادی از سیستم‌های آنزیمی مرتبط است، کمبود آن بسیاری از فرآیندهای بیوشیمیایی را در گیاه مختل می‌کند که می‌تواند با علایم ظاهری مشخصی در آن بروز پیدا کند. بیشتر آسیب‌های ناشی از کمبود روی در گیاه به افزایش تولید ROS و کاهش کارآیی مکانیسم‌های سم‌زدایی در سطوح سلّولی نسبت داده می‌شود (Moghadam *et al*. 2013; Monjezi *et al*. 2013). گزارش‌ها حاکی از اثرات مثبت نانواکسید روی بر بهبود خصوصیات فیزلوژیکی از جمله میزان کلروفیل در گیاهان می‌باشد.

استفاده از نانوکودها می‌تواند سبب بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی نسبت به کاربرد روش‌های سنتی گردد (Alharby *et al*., 2016). عوامل ژنتیکی و محیطی و اثرات متقابل آنها نقش عمده‌ای در رشد و عملکرد گیاهان دارند. درک این عوامل می‌تواند موقعیتی را برای برنامه‌های تحقیقاتی مناسب فراهم آورد که دستاورد آن اصلاح گیاهان و بهبود مدیریت و استفاده از راه‌کارهای به زراعی برای دست‌یابی به عملکردهای بالاتر خواهد بود. بدین منظور در این تحقیق تلاش شد تا با ارزیابی برخی صفات بیوشیمیایی ارقام گندم تحت شرایط کم-آبی، تاثیر محلول‌پاشی برخی محافظ‌های گیاهی بر تحمل به خشکی این ارقام بررسی شود.

مواد و روش‌ها

با هدف بررسی اثر سطوح محلول‌پاشی بر صفات بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط تنش کم‌آبی آخر فصل، دو آزمایش جداگانه در ایستگاه تحقیقات کشاورزی میاندوآب (با طول جغرافیایی °۴۶ و ´۶ و عرض جغرافیایی °۳۶ و ´۵۸ و ارتفاع ۱۳۱۴ متر از سطح دریا) و شهرستان مهاباد (طول جغرافیایی °۴۵ و ´۴۳ و عرض جغرافیایی °۳۶ و ´۱ و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا) در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. آزمایش در هر مکان جداگانه آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل چهار سطح مختلف محلول‌پاشی (شاهد-بدون محلول پاشی)، جاسمونیک اسید (یک میلی‌مولار) (Vahabi *et al*., 2017)، نانو کلات روی (یک در هزار) (Abbasi *et al*., 2019) و سوکسینات (۰/۵ میلی مولار) و فاکتور فرعی شامل ژنوتیپ‌های گندم (شامل دولاین ۹ و ۱۳ و رقم شاهد میهن) بود (جدول ۱) که در دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی آخر فصل اعمال گردید.

میزان تراکم بذر با توجه به عرف منطقه، ۳۵۰ بذر در متر مربع بود. پس از کاشت، یک نوبت آبیاری در پاییز جهت سبز نمودن بذور و استقرار آنها در خاک انجام شد. اواسط فروردین ماه پس از مساعد شدن شرایط محیطی اقدام به کنترل شیمیایی علف‌های هرز با استفاده از علف کش‌های توفوردی و پوماسوپر ۱/۵ لیتر در هکتار گردید. قبل از کاشت ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفره از

منبع سوپر فسفات تریپل و در طول آزمایش کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار بر اساس نتایج آزمون خاک و در سه مرحله به زمین داده شد.

محلول‌پاشی‌ها در زمان ظهور سنبله و قبل از گلدهی (Vahabi *et al*., 2017; Abbasi *et al*., 2019) انجام گرفت. در مرحله رسیدگی، برای اندازه‌گیری صفات از هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی ۱۰ بوته با حذف اثر حاشیه‌ها (از طرفین یک ردیف کاشت و نیم متر از ابتدا و انتهای کرت حذف شد) برداشت و صفات موردنظر اندازه‌گیری گردید.

جهت سنجش کلروفیل a، b و کلروفیل کل از برگ‌های کاملاً توسعه یافته بالغ نمونه‌برداری و پس از هضم توسط استون ۸۰ درصد و سانتریفوژ نمودن نمونه‌ها، مقدار جذب هر نمونه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Lichtenthaler and Wellburn, 1983).

به‌منظور اندازه‌گیری عنصر آهن از دستگاه جذب اتمی استفاده شد. برای استخراج و اندازه‌گیری گلایسین بتائین ابتدا نمونه‌ها خشک شد، سپس به ۰/۵ گرم از برگ ۶۲۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بر روی شیکر قرار داده شد. یک میلی لیتر از عصاره گیاهی با یک میلی لیتر اسید سولفوریک ۲ نرمال مخلوط و در حمام آب یخ قرار گرفت و نهایتاً ۰/۲ میلی‌لیتر از یدید پتاسیم و ید را به مخلوط واکنش اضافه شد. سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای صفر درجه سلسیوس با ۱۰۰۰۰rpm سانتریفوژ شد. مقدار جذب آن در ۳۶۵ نانومتر قرائت گردید. برای رسم منحنی استاندارد از بتائین استفاده شد.

اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز (Lu *et al*., 2009) و گلوتاتیون پراکسیداز با استفاده از روش (Haluskova *et al*., 2009) انجام شد. نتایج به دست آمده بر حسب واحد بر میلی‌گرم پروتئین ارایه شد. در این آزمایش، به‌منظور بررسی اثرات مخرب پراکسیداسیون چربی روی سلول گیاهی مقادیر مالون‌دی آلدهید (MDA) نیز اندازه‌گیری شد. این ارزیابی با استفاده از روش (Lu *et al*., 2009) و با استفاده از اسپکتروفتومتر انجام شد. غلظت مالون‌دی آلدهید از طریق ضریب جذب نور با شدت ۱۵۵×۱۰^{-۶} محاسبه شد. در زمان برداشت عملکرد دانه بر حسب تن در هکتار اندازه‌گیری شد.

در نهایت داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.2 تجزیه شده و مقایسات میانگین با روش دانکن انجام گردید. برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل: در این بررسی محتوی کلروفیلa، کلروفیل b و کلروفیل کل به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر آبیاری، محلول‌پاشی و رقم در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). نتایج نشان داد تیمار تنش کم آبی محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کل را در مقایسه با شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب ۹/۰۳، ۶/۶۶ و ۷/۳۲ درصد کاهش داد (جدول ۳). از عوامل تعیین کننده ظرفیت فتوسنتزی در گیاه محتوای کلروفیل است، تحت شرایط تنش کم‌آبی به واسطه افزایش مقدار فعالیت اکسیژن‌های واکنش‌گر کلروفیل تجزیه و از محتوی آن کاسته می‌شود. در این مطالعه کاهش محتوی کلروفیل a تحت شرایط تنش کم‌آبی بیشتر از کلروفیل b بود،

کسب چنین نتیجه‌ای بیانگر این مطلب است که کلروفیل a به‌دلیل فعالیت بیشتر آنزیم کلروفیلاز حساسیت بیشتری به تنش کم آبی دارد، تنش خشکی باعث کاهش شدید سطح برگ می‌شود، رنگدانه‌های فتوسنتزی را تخریب و فتوسنتز را مختل نموده و موجب کاهش مستقیم رشد گیاه می‌شود (Naeem *et al.*, 2018; Liang *et al.*, 2019).

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای محلول‌پاشی نشان داد اگرچه محلول‌پاشی کلات روی به ترتیب با میانگین ۴/۷۸، ۲/۳۵ و ۷/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بالاترین محتوی کلروفیل a، کلروفیلb و کل را به خود اختصاص دادند اما محلول‌پاشی جاسمونیک اسید و سوکسینات هم توانستند به‌صورت معنی‌داری بر محتوی رنگدانه‌های مذکور در مقایسه با تیمار شاهد بیفزایند. لازم به ذکر است که کمترین رنگدانه‌های مورد بررسی در این آزمایش به تیمار شاهد اختصاص یافت. به نظر می‌رسد محلول‌پاشی کلات روی در مراحل مختلف رشد سبب فراهمی عنصر غذایی مورد نیاز گیاه برای سنتز کلروفیل گردیده است. احمدی (Ahmadi, 2010) بیان نمودند با مصرف نانو ذرات روی، میزان کلروفیل در نخود به‌طور معنی‌داری در مقایسه با عدم مصرف آن افزایش یافت. سلطانا و همکاران (Sultana *et al.*, 2016) نشان دادند که محلول‌پاشی روی باعث کاهش اثرات زیان‌بار تنش خشکی و افزایش قابل توجه در عملکرد گندم شد. علاوه بر نانو کلات روی محلول‌پاشی جاسمونیک اسید نیز محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی را بهبود داد. کاربرد متیل جاسمونات موجب حفاظت از کلروفیل و افزایش فتوسنتز شده است. در تحقیقی دیگر بر روی گیاه مریم گلی محلول‌پاشی اسید جاسمونیک تحت شرایط تنش کم آبی موجب افزایش محتوی کلروفیل برگ شد (Mazarie *et al.*, 2019).

در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی رقم میهن به‌ترتیب با متوسط ۵/۵۰، ۲/۲۳ و ۶/۷۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بالاترین محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کل را به خود اختصاص دادند. به نظر می‌رسد ارقامی که محتوی کلروفیل بالاتری دارند از توانایی جذب نور و تولید مواد فتوسنتز بالاتری برخوردار هستند. اختلاف بین رنگدانه‌های فتوسنتزی در ارقام مختلف گندم در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است (Shahbazi *et al.*, 2016; Naghavi *et al.*, 2014).

محتوای پرولین: در بررسی حاضر اختلاف بین مکان، آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش محلول‌پاشی× آبیاری و رقم × محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد بر مقدار پرولین معنی‌دار بود (جدول ۲). در مطالعه حاضر اگر چه محتوی پرولین در واکنش به تنش کم‌آبی افزایش نشان داد اما محلول‌پاشی هر سه تیمار جاسمونیک اسید، نانوکلات روی و سوکسینات در هر دو شرایط محیطی، محتوی پرولین را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند، در این مطالعه تیمار شاهد محلول‌پاشی تحت شرایط تنش کم‌آبی با متوسط ۳۶/۵۱ میکرومول بر گرم وزن تر بالاترین و تیمار محلول‌پاشی نانو کلات روی تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۲۵/۱ میکرومول بر گرم وزن تر کمترین مقدار غلظت را به خود اختصاص دادند (شکل ۱). یکی از نخستین واکنش‌های گیاهان به تنش کم آبی تجمع برخی محلول‌های سازگار همانند بتائین‌ها، اکتین‌ها و پرولین در گیاهان است. پرولین اسید آمینه‌ای است که در تنظیم اسمزی گیاهان نقش داشته و به سرعت در گیاه تولید می‌شود (Kavi Kishor *et al.*, 2005)،

در این بررسی تحت شرایط تنش کم آبی محتوی کلروفیل کاهش و غلظت اسید آمینه پرولین افزایش نشان داد، از آنجا که کلروفیل و پرولین هر دو از پیش ماده مشترکی به نام گلوتامات سنتز می‌شوند، سنتز پرولین در اثر تنش خشکی مقدار سنتز کلروفیل را کاهش می‌دهد (Aspinall and Paleg, 1981) در تحقیقی گزارش شد که تحت شرایط تنش کم‌آبی محتوای پرولین در گیاهان به شدت افزایش نشان می‌دهد (Shahbazi *et al*., 2016)، افزایش تجمع پرولین در بافت‌های گیاه در اثر تنش کم آبی در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Naghavi *et al*., 2014).

مقایسه میانگین ترکیبات تیماری محلول‌پاشی با رقم از لحاظ اثر بر محتوی پرولین نشان داد هر سه رقم مورد بررسی بالاترین مقدار غلظت پرولین را در تیمار محلول‌پاشی نانوکلات روی نشان دادند (جدول ۴) و محلول‌پاشی هر سه تیمار به‌صورت معنی‌داری بر محتوی پرولین در هر سه رقم افزود، لازم به ذکر است که هر سه رقم کمترین محتوی پرولین را در واکنش به تیمار شاهد نشان دادند. با توجه به نتایج تحقیقات مشخص است که عنصر روی در شرایط تنش کم آبیاری، نقش افزایش‌دهنده در امر تنظیم اسمزی به‌واسطه افزایش میزان پرولین و یا قندهای محلول دارد. همچنین، عنصر روی در سنتز پروتئین‌ها و کربوهیدارت‌ها، متابولیسم سلول، محافظت غشا از رادیکال‌های آزاد اکسیژن و سایر فرآیندهای مرتبط با امر سازگاری گیاهان به تنش‌ها، نقش مهمی ایفا می‌کند (Hemantaranjan, 1996). افزایش محتوی پرولین در واکنش به محلول‌پاشی اسید جاسمونیک می‌تواند به این دلیل باشد که جاسمونیک اسید به‌عنوان تنظیم‌کننده ژن‌های پروتئین‌های بازدارنده مانند هیدروکسی پرولین و پرولین عمل کرده و با تنظیم افزایش آنها به‌ویژه پرولین موجب افزایش میزان این اسید آمینه در شرایط تنش می‌شود (Bagheri *et al*., 2011). اثر مثبت محلول‌پاشی جاسمونیک اسید در افزایش محتوی پرولین تحت شرایط تنش کم آبی در گیاه مریم گلی و زیتون در مطالعات قبلی گزارش شده است (Mazarie *et al*., 2014).

محتوای گلایسین بتائین: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اختلاف بین تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی، رقم و برهمکنش آبیاری × مکان، محلول‌پاشی × مکان، رقم × محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد و رقم × آبیاری در سطح احتمال پنج درصد از نظر اثر بر محتوی گلایسین بتائین معنی‌دار بودند (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای اثر متقابل آبیاری با رقم نشان داد تنش کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری بر مقدار گلایسین بتائین در هر سه ژنوتیپ مورد بررسی افزود، در این بین لاین ۹ تحت شرایط تنش کم‌آبی با متوسط ۱۷۳/۹۴ میلی‌مول بر گرم وزن تر و رقم میهن و لاین ۱۳ به‌ترتیب با متوسط ۱۵۲/۳۹ و ۱۵۳/۱۲ میلی‌مول بر گرم وزن تر کمترین محتوی گلایسین بتائین را به خود اختصاص دادند.

گلایسین بتائین یکی از معمول‌ترین و متداول‌ترین ترکیبات آمونیومی چهارگانه در گیاهان می‌باشند که از طریق تنظیم اسمزی سلول، حفاظت از پروتئین‌ها و غشاهای سلولی در مقابل دماهای بالا، پایداری غشا، خنثی‌سازی سمیت انواع اکسیژن فعال، کاهش آسیب سلولی و محافظت از آنزیم‌های مختلف، در شرایط تنش نقش تنظیم‌کننده اسمزی را دارد و تحمل گیاهان را به تنش افزایش می‌دهد (Ashraf and Foolad,

2007). مقایسه میانگین تیمارهای برهمکنش محلول‌پاشی با رقم نشان داد محلول‌پاشی جاسمونیک اسید و نانو کلات روی در رقم میهن و محلول‌پاشی جاسمونیک اسید، نانو کلات روی و سوکسینات در لاین‌های ۹ و ۱۳ توانست به صورت معنی‌داری محتوی گلایسین بتائین را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دهد، در مطالعه حاضر رقم میهن و لاین ۹ تحت تیمار جاسمونیک اسید به‌ترتیب با متوسط ۱۸۶/۲۵ و ۱۸۸/۳۳ واحد بالاترین و هر سه رقم مورد بررسی تحت تیمار شاهد کمترین محتوی گلایسین بتائین به خود اختصاص دادند (شکل ۲).

فعالیت آنزیم کاتالاز: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اختلاف بین تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و رقم و برهمکنش رقم × محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای آبیاری از نظر اثر بر مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز نشان داد تنش کم‌آبی مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را در مقایسه با تیمار آبیاری نرمال ۱۸/۱۸ درصد افزایش داد (جدول ۳). در مطالعه‌ای بر روی گندم خشکی باعث کاهش کلروفیل، کاروتنوئید، محتوای آب، وزن خشک برگ و ریشه، نسبت R-S، MSI و افزایش MDA، EL، پرولین، قند محلول، تجمع H_2O_2 و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی (SOD، CAT و APX) شد. افزایش در مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان در گیاهان مختلف تحت شرایط تنش کم‌آبی در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Gujjar *et al*., 2021; Hamurcu *et al*., 2020). در این مطالعه محلول‌پاشی جاسمونیک اسید، نانو کلات روی و سوکسینات مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را در هر سه رقم مورد بررسی به صورت معنی‌داری افزایش دادند و در تیمار محلول‌پاشی نانو کلات روی مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز به بالاترین مقدار خود در هر سه رقم رسید، این در حالی بود که کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز برای هر سه رقم در تیمار شاهد محلول‌پاشی ثبت شد. نتایج تحقیق حاضر همچنین نشان داد لاین ۹ تحت تیمار شاهد و لاین ۱۳ تحت تیمار محلول‌پاشی نانو کلات روی به‌ترتیب با مقادیر ۵/۰۰ و ۳/۱۷ میکرومول بر گرم وزن تر به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را به خود اختصاص دادند. ثابت شده است که گیاهان قادر به ایجاد یک سری سیستم‌های آنزیمی و غیرآنزیمی بازدارنده ROS برای مقابله با آسیب اکسیداتیو ناشی از رادیکال‌های فعال اکسیژن و حفظ تعادل ردوکس در گیاهان هستند. همیشه سطوح بالای آنتی اکسیدان‌ها و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی برای غلبه بر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش‌های مختلف به‌خصوص تنش خشکی ممکن است کافی نباشد، با این حال، در تیمارهای محلول‌پاشی سطوح آنتی‌اکسیدان‌ها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در مطالعه حاضر افزایش داد که ممکن است مسئول سم‌زدایی اکسیژن‌های واکنش‌گر یا ROS باشند. زند و همکاران (Zand *et al*., 2010) اظهار داشت کاربرد ترکیبات مختلف عنصر روی، موجب افزایش سطح فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسیددسموتاز ذکر شده گردید و بنابراین محلول‌پاشی روی، قادر است سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی گیاه را تقویت نموده، گیاه را نسبت به بروز شرایط تنش مانند تنش کمبود آب متحمل‌تر سازد. به نظر می‌رسد محلول‌پاشی روی گیاه را از کمبود تغذیه ناشی از تنش محافظت می‌کند و می‌تواند به سیستم

دفاعی گیاه در جهت مقابله با تنش کمک کند. عنصر روی به‌عنوان یک کاتالیزور در واکنش‌ها عمل نموده و موجب تسریع واکنش‌ها می‌شود، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار محلول‌پاشی روی در ذرت در مطالعه داریوش‌کریمی و همکاران (Daruish karimi *et al*., 2021) گزارش شده است. جاسمونیک اسید در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون ردوکتاز، گلوتاتیون پراکسیداز و اسکوربات پراکسیداز نقش دارد (Wu *et al*., 2012).

فعالیت گلوتاتیون رودکتاز: بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و ارقام و همچنین برهمکنش محلول‌پاشی × آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر مقدار فعالیت آنزیم گلوتاتیون رودکتاز معنی‌دار بود (جدول ۲). در بین ارقام مورد بررسی بالاترین مقدار فعالیت آنزیم گلوتاتیون رودکتاز با متوسط ۲/۳۳ واحد در لاین ۹ تولید شد، کمترین مقدار فعالیت انزیم مذکور با متوسط ۲/۲۲ به لاین ۱۳ اختصاص داشت، اختلاف بین لاین ۱۳ و رقم بهمن از نظر محتوی گلوتاتیون رودکتاز معنی‌دار نبود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول‌پاشی از لحاظ اثر بر مقدار فعالیت آنزیم گلوتاتیون رودکتاز نشان داد تنش کم آبی به صورت معنی‌داری بر مقدار فعالیت آنزیم مذکور افزود با این حال محلول‌پاشی تیمارهای جاسمونیک اسید، نانوکلات روی و سوکسینات به صورت معنی‌داری مقدار فعالیت آنزیم مذکور را در هر دو شرایط افزایش دادند، در مطالعه حاضر تیمار محلول‌پاشی نانو کلات روی تحت تیمار تنش کم آبی با متوسط ۲/۸۶ میکرومول بر گرم وزن تر بالاترین و تیمار شاهد تحت تیمار آبیاری نرمال با متوسط ۱/۸۳ میکرومول بر گرم وزن تر کمترین مقدار فعالیت آنزیم گلوتاتیون رودکتاز را به خود اختصاص دادند (شکل ۳).

فعالیت سوپراکسید دیسموتاز: در این آزمایش اثرهای اصلی آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش محلول‌پاشی× مکان و رقم × محلول پاشی در سطح احتمال یک درصد بر مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج آزمایش حاضر نشان داد تنش کم‌آبی مقدار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز را در مقایسه با تیمار آبیاری نرمال ۲۳/۳۵ درصد افزایش داد (جدول ۲). سوپراکسیددیسموتاز یک آنتی اکسیدان قوی است که اولین ماده تولید شده از احیای یک ظرفیتی اکسیژن، یعنی رادیکال سوپراکسید را از بین می‌برد، بنابراین SOD به دفاع اولیه در مقابل رادیکال‌های آزاد اکسیژن اطلاق می‌شود (Fleta-Soriano *et al*., 2017). گزارش‌های موجود نیز حاکی از افزایش فعالیت آنزیم SOD در سلول‌ها، در پاسخ به تنش‌های مختلف محیطی (Cui *et al*., 2017) بوده است.

نتایج مقایسه میانگین ترکیبات تیماری محلول‌پاشی با رقم از لحاظ اثر بر مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نشان داد هر سه رقم بالاترین و پایین‌ترین مقدار فعالیت آنزیم مذکور را تحت تیمار محلول‌پاشی نانو کلات روی و تیمار شاهد نشان دادند، در این مطالعه لاین ۹ تحت تیمار نانو کلات روی و محلول‌پاشی جاسمونیک اسید به‌ترتیب با متوسط ۴/۱۰ و ۴/۰۸ میکرومول بر گرم وزن تر بالاترین و لاین ۱۳ تحت تیمار شاهد با متوسط ۲/۳۹ میکرومول بر گرم وزن تر کمترین مقدار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز را به خود اختصاص دادند (جدول ۴). افزایش مقدار

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در اثر محلول پاشی عنصر روی و تنش خشکی در مطالعه داریوش‌کریمی و همکاران (Daruish karimi *et al*., 2021) نیز گزارش شده است که همسو با نتایج مطالعه حاضر است. همچنین، اثر مثبت محلول‌پاشی اسید جاسمونیک در افزایش فعالیت آنزیم آنتی اکسیدان مریم‌گلی (Mazarie *et al*., 2014) و کلزا (Kumari *et al*., 2006) در مطالعات قبلی گزارش شده است.

محتوای مالون دی آلدهید: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد محتوای مالون‌دی آلدهید به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر اثر آبیاری و برهمکنش محلول‌پاشی× مکان، رقم × مکان و رقم × محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). نتایج مطالعه حاضر نشان داد تنش کم آبی مقدار مالون دی آلدهید را در مقایسه با تیمار آبیاری نرمال ۷/۱۷ درصد افزایش داد (جدول ۲). آسیب اکسیداتیو پیامد اصلی تنش‌های محیطی به‌دلیل تجمع بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن واکنش‌کر (ROS) است (Naeem *et al*., 2018). شدت آسیب اکسیداتیو به غشای سلولی توسط H_2O_2 به‌عنوان پراکسیداسیون لیپیدی معمولاً به عنوان MDA اندازه‌گیری می‌شود. برای مقابله با آسیب اکسیداتیو، گیاهان یک مکانیسم دفاعی موثر از آنتی‌اکسیدان‌ها (آنزیمی/غیرآنزیمی) از جمله سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پلی‌فنل اکسیداز (POD)، کاتالاز (CAT) و آسکروبات پراکسیداز (APX)ایجاد کرده‌اند (Wang *et al*., 2016; Cui *et al*., 2017). نتایج مقایسه میانگین ترکیبات تیماری رقم با محلول‌پاشی از لحاظ مقدار مالون دی آلدهید نشان داد محلول‌پاشی هر سه تیمار جاسمونیک اسید، نانوکلات روی و سوکسینات مقدار مالون دی آلدهید را در هر سه رقم مورد بررسی به صورت معنی‌داری کاهش دادند. در بررسی حاضر لاین ۹ تحت تیمار شاهد محلول پاشی با متوسط ۷/۰۸ میکرو مول بر گرم وزن تر بالاترین و لاین ۱۳ تحت تیمار سوکسینات با متوسط ۵/۶۷ میکرومول بر گرم وزن تر کمترین مقدار مالون‌دی آلدهید را به‌خود اختصاص داد (جدول ۴). اثر کاهشی عنصر روی بر میزان مالون‌دی آلدهید نشاندهنده اثر این عنصر بر محافظت از غشای سلولی و ممانعت از تشکیل ROS تحت تنش خشکی می‌باشد (Wu *et al*., 2015). علاوه بر این، روی با سیستئین و هیستیدین باند شده و تشکیل ROS را محدود می‌کند (Tsonev and Lidon, 2012). به‌کارگیری روی در گیاه برنج تحت تنش خشکی موجب افزایش تظاهر پروتئین ها و آنزیم‌های آنتی اکسیدان شده و در نتیجه اثرات زیان‌بار تنش اکسیدتیو را کاهش داد (Thounaojam *et al*., 2014).

عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد عملکرد دانه به‌صورت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر آبیاری، محلول‌پاشی، رقم و برهمکنش محلول‌پاشی× آبیاری و رقم × محلول پاشی قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول‌پاشی نشان داد محلول‌پاشی نانو کلات روی تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۴/۵۱ تن در هکتار بالاترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. اختلاف بین تیمار مذکور و تیمار محلول‌پاشی جاسمونیک اسید و سوکسینات تحت شرایط آبیاری نرمال از لحاظ آماری معنی‌دار نبود، در این بررسی تیمار شاهد محلول‌پاشی تحت شرایط آبیاری نرمال با متوسط ۳/۶۲ تن در هکتار

کمترین عملکرد دانه را به‌خود اختصاص داد (شکل ۴). نتایج همچنین نشان داد تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی تنها محلول‌پاشی نانو کلات روی توانست عملکرد دانه را در مقایسه با تیمار شاهد به‌صورت معنی‌داری افزایش دهد. در این تحقیق محلول‌پاشی نانو کلات روی موجب بهبودی و حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی و همچنین بهبود خصوصیات بیوشیمیایی در ارقام گندم به خصوص رقم میهن شد، بنابراین می‌توان اظهار داشت پایداری کلروفیل در برگ‌ها تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش کم آبی باعث شده است مقدار تولید مواد فتوسنتزی در گیاه افزایش یافته و متعاقب آن عملکرد دانه نیز بهبود یافته است. ندیم و همکاران (Nadim *et al*., 2011) دریافتند کاربرد همزمان و جداگانه عناصر ریزمغذی به خصوص روی عملکرد دانه را در گندم افزایش داد. به نظر می‌رسد در شرایط تنش، محلول‌پاشی‌کلات روی تأثیر بیشتری بر عملکرد دانه داشته است. تغذیه مناسب گیاهی در بالا بردن سطح تحمل گیاهان در مقابل انواع تنش‌ها نقش به‌سزایی دارد و می‌تواند تا حدی به گیاه در تحمل به تنش‌های مختلف کمک کند (Tabatabaeiyan *et al*., 2013). افزایش عملکرد دانه با مصرف عنصر روی علل مختلفی می‌تواند داشته باشد که از آن جمله می‌توان به افزایش بیوسنتز اکسین، افزایش فتوسنتز در نتیجه افزایش غلظت کلروفیل، افزایش فعالیت فسفوانول پیروات کربوکسیلاز و ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز در بافت‌های گیاهی و نیز افزایش کارایی جذب نیتروژن و فسفر اشاره نمود (Nateghi *et al*., 2015). در گندم، عنصر روی باعث تخصیص بیشتر منابع فتوسنتزی از ساقه به سنبله‌ها می‌شود که افزایش وزن دانه را به دنبال دارد. فراهمی کافی روی در شرایط تنش خشکی موجب حفظ پایداری غشا، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان و در نهایت پایداری عملکرد می‌گردد (Karam *et al*., 2007; Babaeian *et al*., 2010). ساحا و همکاران (Saha *et al*., 2018) در گندم نیز گزارش کردند که محلول‌پاشی با روی موجب بهبود عملکرد گندم گردید. پورجمشید (Pourjamshid, 2021) گزارش نمود تنش کم آبی عملکرد دانه را در گندم به‌صورت معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش داد اما کاربرد مجزا و ترکیبی عناصر آهن، روی و منگنز عملکرد دانه را نسبت به تیمار شاهد در هر دو شرایط محیطی افزایش داد. مقایسه میانگین ترکیبات تیماری رقم با محلول‌پاشی از لحاظ اثر بر عملکرد دانه نشان داد محلول‌پاشی نانوکلات روی در رقم میهن با متوسط ۴/۷۲ تن در هکتار بالاترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد در حالی که لاین شماره ۹ در تیمار شاهد با متوسط ۳/۷۰ تن در هکتار کمترین عملکرد دانه را نشان داد. مقایسات ترکیبات تیماری نشان داد تحت تیمار شاهد، نانو کلات روی و سوکسینات رقم میهن و تحت تیمار محلول‌پاشی جاسمونیک اسید لاین شماره ۱۳ کمترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد (جدول ۴).

در این مطالعه رقم میهن تحت تیمار شاهد محلول‌پاشی هم در مقایسه با دو لاین دیگر از عملکرد دانه بالاتری برخوردار بود لذا می‌توان اظهار داشت که پتانسیل ژنتکی رقم مذکور در تولید و انتقال مواد فتوسنتزی و در نتیجه تشکیل عملکرد دانه در این رقم بالا است و دو لاین دیگر قابلیت رقابت را با این رقم نداشتند، همچنین رقم میهن تحت شرایط محلول‌پاشی به‌خصوص محلول‌پاشی نانوکلات روی توانست بالاترین عملکرد دانه را تولید نماید، لذا پتانسیل این رقم

در جذب و بهره‌برداری از شرایط مساعد محیطی بالاتر از دو لاین دیگر است. گزارش شده است که با محلول‌پاشی عنصر روی در شرایط خشکی طول ریشه افزایش یافته و در نتیجه با دسترسی گیاه به توده خاک بیشتر، جذب آب از خاک و در نتیجه عملکرد افزایش می‌یابد (Gadallah, 2000).

نتیجه‌گیری نهایی

در مطالعه حاضر تنش کم‌آبی از محتوی کلروفیل و عملکرد دانه کاست و بر محتوی پرولین، گلایسین بتائین، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مالون‌دی آلدهید افزود، اما محلول‌پاشی نانوکلات روی به‌صورت قابل توجهی بر محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی، پرولین، گلایسین بتائین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و عملکرد دانه افزود، و مقدار پراکسیداسیون چربی‌های غشای سلولی (مالون دی آلدهید) را کاست، لذا می‌توان نتیجه گرفت نانو کلات روی از طریق بهبود خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و محتوی پرولین و گلایسین بتائین در هر دو شرایط میزان تولید و پایداری رنگدانه های فتوسنتزی را افزایش داده و از این طریق توانسته است عملکرد دانه را افزایش دهد. در بین ارقام مورد بررسی رقم میهن علاوه بر اینکه از عملکرد دانه بالاتری در مقایسه با دو لاین ۹ و ۱۳ برخوردار بود توانست بالاترین عملکرد دانه را در هر دو شرایط آبیاری با محلول‌پاشی نانوکلات روی به خود اختصاص دهد، بنابراین می‌توان اظهار داشت محلول‌پاشی نانوکلات روی و استفاده از رقم مناسب (میهن) می‌تواند راهکاری برای حصول حداکثر عملکرد اقتصادی در مناطقی باشد که گیاه با دوره‌های از تنش کم آبی با شدت‌های مختلف روبرو است.

جدول ۱- شجره ژنوتیپ های مورد بررسی

Table 1- Pedigree of studied genotypes

Genotypes	ژنوتیپ	Pedigree	شجره
C-97-1		Mihan	
C-97-9		Charger//CMH80A.768/3*Cno79	
C-97-13		Boh4/7/Wa476/3/391//Num/5/W22/5/Ana/6/Tam200/Kasyan	

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب صفات بیوشیمیایی و عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط آبیاری و محلول پاشی در دو مکان

Table 2- Combine variance analysis of biochemical traits and grain yield of wheat genotypes under irrigation and Foliar application conditions in two locations

S.O.V. منابع تغییر	درجه آزادی Df	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Total chl	پرولین Prolin	گلایسین بتائین Glycine betaine
مکان (L) Location	1	0.04^{ns}	0.07^{ns}	0.22^{ns}	895.57**	133.91^{ns}
تکرار (مکان)Repeat (location)	4	0.09	0.03	0.28	3.46	55.29
شرایط آبیاری (I) Irrigation	1	5.22**	0.75**	10.29**	125.58**	12911.0**
شرایط آبیاری × مکانI× L	1	0.04^{ns}	0.009^{ns}	0.08^{ns}	3.55**	88.86**
خطای یک E1	4	0.005	0.0007	0.007	0.05	12.48
محلول‌پاشی(F) Foliar application	3	2.83**	0.71**	8.78**	627.13**	8606.74**
محلول پاشی× مکانF× L	3	0.005^{ns}	0.004^{ns}	0.01^{ns}	0.004^{ns}	775.68**
محلول پاشی × شرایط آبیاریF× I	3	0.002^{ns}	0.0005^{ns}	0.0005^{ns}	90.10**	0.18^{ns}
محلول پاشی× مکان× آبیاریF×I× L	3	0.001^{ns}	0.0001^{ns}	0.0003^{ns}	0.0009^{ns}	0.0001ns
رقم (C) Cultivar	2	0.22**	0.097**	0.73**	102.93**	105.51**
رقم × مکانC×L	2	0.04^{ns}	0.011^{ns}	0.10^{ns}	9.57**	3.07ns
رقم × شرایط آبیاریC×I	2	0.009^{ns}	0.001^{ns}	0.01^{ns}	0.08^{ns}	24.77*
رقم × محلول‌پاشیC×F	6	0.002^{ns}	0.0001^{ns}	0.08^{ns}	19.25**	274.97**
رقم × مکان × شرایط آبیاریC×L× I	2	0.002^{ns}	0.001^{ns}	0.0001^{ns}	0.004^{ns}	0.19^{ns}
رقم × مکان × محلول‌پاشیC×L× F	6	0.009^{ns}	0.005^{ns}	0.04^{ns}	0.37**	0.23^{ns}
رقم × مکان × محلول‌پاشی × آبیاری C×L× I× F	12	0.0006^{ns}	0.0001^{ns}	0.001^{ns}	0.006^{ns}	1.43^{ns}
خطای دوE2	64	0.014	0.005	0.051	0.62	6.94
ضریب تغییرات C.V. %		2.70	3.51	3.54	2.57	5.58

**، *: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵.

**, * : Significant at the probability level of 0.01 and 0.05, respectively.

ادامه جدول ۲

Table 2- Continued

S.O.V. منابع تغییر	درجه آزادی Df	کاتالاز Catalase	گلوتاتیون ردوکتاز Glutation reductase	سوپراکسید دیسموتاز Super oxide dismutase	مالون دی آلدهید Malondialdehyde	عملکرد دانه Grain yield
مکان (L) Location	1	3.68**	6.48**	10.36**	60.14**	3.58^{ns}
تکرار (مکان)Repeat (location)	4	0.21	0.06	0.22	0.29	4.21
شرایط آبیاری (I) Irrigation	1	0.64**	0.49**	0.45**	6.75**	11.46**
شرایط آبیاری × مکانI× L	1	0.007^{ns}	0.01^{ns}	0.008^{ns}	0.02ns	0.35^{ns}
خطای یک E1	4	0.004	0.005	0.0004	0.006	0.03
محلول‌پاشی(F) Foliar application	3	14.35**	6.54**	74.15**	2.60ns	0.74**
محلول پاشی× مکانF× L	3	0.20ns	0.39^{ns}	0.21**	5.56**	0.007^{ns}
محلول پاشی × شرایط آبیاریF× I	3	0.0009ns	7.21**	0.0001^{ns}	0.006ns	0.81**
محلول پاشی× مکان× آبیاریF×I× L	3	0.0001^{ns}	0.0001^{ns}	0.0002^{ns}	0.007ns	0.07^{ns}
رقم (C) Cultivar	2	0.63**	0.16**	0.87**	5.46ns	2.90**
رقم × مکانC×L	2	0.06^{ns}	0.01^{ns}	0.10^{ns}	2.31**	0.04^{ns}
رقم × شرایط آبیاریC×I	2	0.001^{ns}	0.0007^{ns}	0.0007^{ns}	0.01ns	0.15^{ns}
رقم × محلول‌پاشیC×F	6	0.22**	0.02^{ns}	0.15**	3.08**	0.57**
رقم × مکان × شرایط آبیاریC×L× I	2	0.001^{ns}	0.0004^{ns}	0.0007^{ns}	0.0001ns	0.01^{ns}
رقم × مکان × محلول‌پاشیC×L× F	6	0.003^{ns}	0.04^{ns}	0.03^{ns}	0.002ns	0.02^{ns}
رقم × مکان × محلول‌پاشی × آبیاری C×L× I× F	12	0.009^{ns}	0.0006^{ns}	0.0003^{ns}	0.0007ns	0.01^{ns}
خطای دوE2	64	0.046	0.013	0.04	0.043	0.15
ضریب تغییرات C.V. %		5.10	5.21	6.26	3.34	9.76

**، *: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵

**, * : Significant at the probability level of 0.01 and 0.05, respectively.

جدول ۳- مقایسه مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری، محلول پاشی و رقم از لحاظ اثر بر صفات مورد بررسی

Table 3- Mean comparison of the main effects of irrigation, foliar application and variety in terms of effect on the studied traits

تیمار Treatment	کلروفیل a Chl a mg.g^{-1} FW	کلروفیل b Chl b mg.g^{-1} FW	کلروفیل کل Total chl mg.g^{-1} FW	سوپراکسید دیسموتاز SOD µmol.g^{-1}FW	کاتالاز CAT µmol.g^{-1}FW	گلوتاتیون ردوکتاز GR µmol.g^{-1}FW
شرایط آبیاری Irrigation						
شرایط نرمال Normal	4.65a	2.25a	6.83a	3.34b	4.02b	2.20b
تنش کم آبی Water deficit	4.23b	2.10b	6.33b	3.45a	4.16a	3.32a
محلول‌پاشی Foliar application						
شاهد Control	4.14d	2.03d	6.19d	2.47d	3.34d	1.89d
جاسمونیک اسید Jasmonic acid	4.50b	2.22b	6.73b	3.95a	4.40b	2.40b
کلات روی Zinc chelate	4.78a	2.35a	7.10a	3.77b	4.78a	2.80a
سوکسینات Succinate	4.27c	2.11c	6.38c	3.37c	3.84c	1.95c
رقم Cultivar						
Mihan	5.50a	2.23a	6.74a	3.25c	4.00b	2.23b
Line 9	4.39b	2.16b	6.56b	3.52a	4.22a	2.33a
Line 13	4.38b	2.15b	6.51b	3.41b	4.05b	2.22b

مقادیر دارای حداقل یک حرف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد.

Values with at least one common letter have no statistically significant difference.

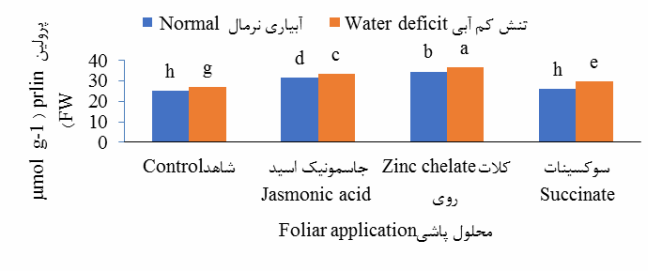
جدول ۴ – مقایسه میانگین ترکیبات تیماری محلول پاشی با رقم از لحاظ اثر بر صفات مورد بررسی

Table 4- Mean comparison of the combinations of foliar application with cultivar treatments in terms of effect on studied traits

محلول پاشی	رقم	پرولین Prolin mg.g^{-1} FW	گلایسین بتائین Gly-Betaein µmol.g^{-1}FW	کاتالاز CAT µmol.g^{-1}FW	سوپراکسید دیسموتاز SOD µmol.g^{-1}FW	مالون‌دی آلدهید MDA µmol.g^{-1}FW	عملکرد دانه Grain Yield t.ha^{-1}
شاهد Control	میهن Mihan	28.06i	151.34g	3.37g	2.45ef	6.73b	4.36b
	Line 9	27.49h	151.43g	3.47g	2.57e	7.08a	4.03cde
	Line 13	24.53j	151.12g	3.17h	2.39f	5.15g	4.02cdef
جاسمونیک اسید Jasmonic acid	میهن Mihan	29.76f	186.25a	4.25d	3.68b	5.67f	3.96def
	Line 9	34.94c	188.33a	4.46c	4.08a	6.07e	3.79ef
	Line 13	32.49e	177.98b	4.49c	4.10a	6.00e	4.23bcd
نانو کلات روی Zinc chelate	میهن Mihan	33.42e	161.97e	4.73b	3.66b	6.00e	4.72a
	Line 9	37.44a	164.13d	5.00a	3.95a	6.43cd	3.72ef
	Line 13	36.02b	172.36c	4.60bc	3.71b	6.03e	4.29bc
سوکسینات Succinate	میهن Mihan	28.21g	150.99g	3.65f	3.20d	6.30d	4.13bcd
	Line 9	2924f	156.53f	3.95e	3.46c	6.81b	3.70f
	Line 13	29.14g	148.33h	3.93e	3.45c	6.55c	3.93def

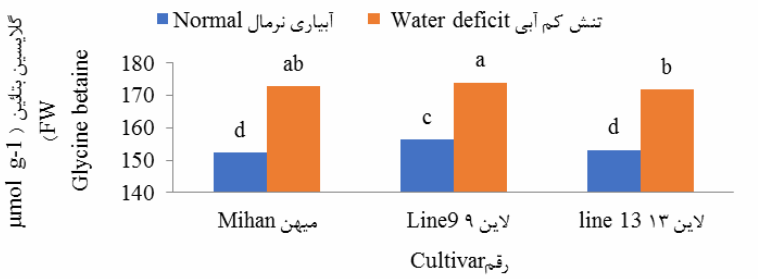
مقادیر دارای حداقل یک حرف مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد.

Values with at least one common letter have no statistically significant difference.



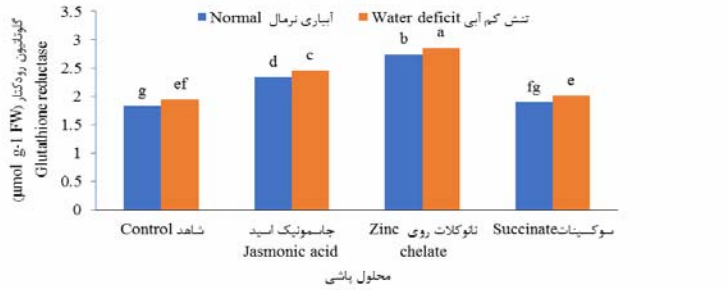
شکل ۱- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول پاشی از لحاظ اثر بر محتوی پرولین

Figure 1- Mean comparison of the combinations of irrigation with foliar application treatments in terms of effect on proline content



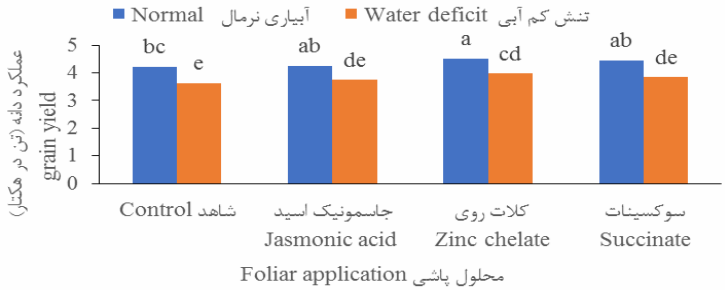
شکل ۲- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با رقم از لحاظ اثر بر محتوی بتاگلایسین

Figure 2- Mean comparison of the combinations of irrigation with cultivar treatments in terms of effect on Glycine betaine content



شکل ۳- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول پاشی از لحاظ اثر بر محتوی گلوتاتیون ردوکتاز

Figure 3- Mean comparison of the combinations of irrigation with foliar application content treatments in terms of effect on Glutathione reductase



شکل ۴- مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول پاشی از لحاظ اثر بر عملکرد دانه

Figure 4- Mean comparison of the combinations of irrigation with foliar application treatments in terms of effect on grin yield

References منابع مورد استفاده

- Abbasi, N., J. Cheraghi, and S. Hajinia. 2019. Effect of iron and zinc micronutrient foliar application as nano and chemical on physiological traits and grain yield of two bread wheat cultivars. *Scientific Journal of Crop Physiology*. 11(43):85- 104.
- Aftab, T., M. Masroor, A. Khan, M. Idrees, M. Naeem, and N. Hashmi. 2011. Methyl jasmonate counteracts boron toxicity by preventing oxidative stress and regulating antioxidant enzyme activities and artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L. *Protoplasma*. 248: 601-612.
- Ahmadi, M. 2010. Effect of zinc sulfate fertilizer on physiological characteristics and yield of chickpea under different planting densities. Proceedings of the 11th Congress of Plant Agriculture reform, 2-4 Jul. Tehran, Iran.
- Alharby, H.F., E.M.R. Metwali, M.P. Fuller, and A. Aldhebiani. 2016. Impact of application of zinc oxide nanoparticles on callus induction, plant regeneration, element content and antioxidant enzyme activity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under salt stress. *Archives of Biological Sciences*. 68: 723-735.
- Anonymous. 2019. FAO. World Food and Agriculture. Statistical Yearbook. Available online: http://www.fao.org/3/i3107e/i3107e. pdf (accessed on 20 May 2019).
- Ashraf, M., and M.R. Foolad. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*. 59: 206-216.
- Aspinall, D., and L.G. Paleg. 1981. Proline accumulation physiological aspects. In: Paleg, L.G., and D. Aspinall, (Eds) Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. 205 pp. Sydney Academic Press.
- Babaeian, M., M. Heidari, and A. Ghanbari. 2010. Effect of water stress and foliar micronutrient application on physiological characteristics and nutrient uptake in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Crop Science*. 12: 311–391. (In Persian).
- Barati, V., H. Ghadiri, S. Zand-Parsa, and N. Karimian. 2015. Nitrogen and water use efficiencies and yield response of barley cultivars under different irrigation and nitrogen regimes in a semi-arid Mediterranean climate. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 61: 15–32.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification. *Plant and Soil*. 30: 1–17.
- Cui, G., X. Zhao, S. Liu, F. Sun, C. Zhang, and Y. Xi. 2017. Beneficial effects of melatonin in overcoming drought stress in wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* .118:138_149
- Darush Karimi, N., M. Mojaddam, S. Lack, K. Payandeh, and A. Shokuhfar. 2021. Effect of drought stress and foliar application of zinc and iron on some biochemical parameters of cumin. *Journal of Crops Improvement*. 17: 855-866. (In Persian).
- Farooq, M., A. Wahid, N. Kobayashi, D. Fujita, and S. Basra. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management, sustainable agriculture. Springer. pp. 153 - 88.

- Fleta-Soriano, E., L. Díaz, E. Bonet, and S. Munné-Bosch 2017. Melatonin may exert a protective role against drought stress in maize. *Journal of Agronomy and Crop Science.* 203:286-294.
- Gadallah, N.A.A. 2000. Effects of indol -3-acetic acid and zinc on the growth, osmotic potential and soluble carbon and nitrogen components of soybean plants growing under water deficit. *Journal of Arid Environments*. 44: 451-567.
- Gujjar, R.S., S. Roytrakul, W. Chuekong, and K. Supaibulwatana .2021. A synthetic cytokinin infuences the accumulation of leaf soluble sugars and sugar transporters, and enhances the drought adaptability in rice. *Biotechnology*. 11:1–14.
- Haluskova, L., K. Valentovicova, J. Huttova, I. Mistrik, and L. Tamas. 2009. Effect of abiotic stresses on glutathione peroxidase and glutathione S-transferase activity in barley root tips. *Plant Physiology and Biochemistry*. 47: 1069–1074.
- Hamurcu, M., M.K. Khan, A. Pandey, C. Ozdemir, Z.Z. Avsaroglu, F. Elbasan, A.H. Omay, and S. Gezgin. 2020. Nitric oxide regulates watermelon (*Citrullus lanatus*) responses to drought stress. *Biotechnology*. 10:1–14.
- Hemantaranjan, A. 1996. Physiology and biochemical significance of zinc in plants. Advancement in micronutrient research. Scientific Publishers, Jodhpurs, Rajasthan, India, pp. 151-178.
- Karam, F., R. Lahoud, R. Masaad, R. Kabalan, J. Breidi, C. Chalita, and Y. Rouphael. 2007. Evaporation, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 90: 213–223.
- Kavi Kishor, P.B., S. Sangam, R.N. Amrutha, P.S. Laxmi, K.R. Naido, S.S. Rao, K. Reddy, P. Theriappan, and N. Sreenivasulu. 2005. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*. 88: 424-438.
- Kumari, G.J., A.M. Reddy, S.T. Naik, S.G. Kumar, J. Prasanthi, G. Sriranganayakulu, P.C. Reddy, and C. Sudhakar. 2006. Jasmonic acid induced changes in protein pattern, anti oxidative enzyme activities and peroxidase isozymes in peanut seedlings. *Biologia Plantarum*. 50: 219-226.
- Liang, D., Z. Ni, H. Xia, Y. Xie, X. Lv, J. Wang, L. Lin, Q. Deng, and X. Luo. 2019. Exogenous melatonin promotes biomass accumulaton and photosynthesis of kiwifruit seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae.* 246: 34-48.
- Lichtenthaler, H., and A. Wellburn. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 603: 591-592.
- Lu, S., W. Su, H. Li, and Z. Guo. 2009. Abscisic acid improves drought tolerance of triploid bermudagrass and involves H_2O_2 and NO induced antioxidant enzyme activities. *Plant Physiology and Biochemistry*. 47: 132 - 138.
- Mazarie, A., S.M. Mousavi-nik, A. Ghanbari, and L. Fahmideh. 2019. Effects of spraying jasmonic acid on some morpho-physiological traits, antioxidant enzymes activity and essential oil yield of *Salvia officinalis* L. under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*. 35: 89-97. (In Persian).
- Moghadam, H.R.T., H. Zahedi, and A. Ashkiani. 2013. Effect of zinc foliar application on auxin and gibberellin hormones and catalase and superoxide dismutase enzyme

activity of corn (*Zea mays* L.) under water stress. *Maydica Electronic Publication*. 218-223.

- Monjezi, F., F. Vazini, and M. Hassanzadehdelouei. 2013. Effects of iron and zinc spray on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) in drought stress. *Cercetări Agronomice în Moldova*. 5(1): 153-168.
- Nadim, M.A., I.U. Awan, M.S. Baloch, E.A. Khan, KH. Naveed, and M.A. Khan. 2011. Effect of micronutrients on growth and yield of wheat. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 48: 191-196.
- Naeem, M., M.S. Naeem, R. Ahmad, R. Ahmad, M.Y. Ashraf, M.Z. Ihsan, F. Nawaz, A. Hurr, M. Ashraf, H.T. Abbas, and M. Abdullah. 2018. Improving drought tolerance in maize by foliar application of boron: water status, antioxidative defense and photosynthetic capacity. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 64: 626-639.
- Naghavi, M.R., M. Moghaddam, M. Toorchi, and M.R. Shakiba. 2014. Evaluation of spring wheat cultivars for physiological, morphological and agronomic traits under drought stress. *Journal of Crop Breeding*. 8(18): 62-77. (In Persian).
- Nateghi, S., A. Pirzad, and R. Darvishzadeh. 2015. Effect of Fe and Zn micro nutrients on yield and yield components of *Pimpinella anisum* L. *Journal of Horticulture Science*. 29(1): 37-46.
- Norastehnia, A., R.H. Sajedi, and M. Nojavan-Asghari. 2007. Inhibitory effects of methyl jasmonate on seed germination in maize (*Zea Mays* L.): effect on amylase activity and ethylene production. *Applied Plant Physiology*. 33: 13-23.
- Pourjamshid, S.A. 2021. Study the effect of iron, zinc and manganese foliar application on morphological and agronomic traits of bread wheat (*Chamran cultivar*) under irrigation regime. *Environmental Stresses in Crop Sciences.* 1:109-118. (In Persian).
- Saha, S., B. Mandal Hazra, A. Dey, M. Chakraborty, B. Adhikari, S.K. Mukhopadhyay, and R. Sadhukhan. 2018. Can agronomic bio-fortification of zinc be benign for iron a cereals. *Journal of Cereal Science*. 65: 186-191.
- Savari, A., M. Fotokian, and M. Barzali. 2009. Evaluation of glycine betaine effects on some agronomic traits of cotton cultivars under water-drought stress. *Journal of Daneshvar Agronomy Sciences*. 1: 67-76. (In Persian).
- Shahbazi, H., A. Arzani, and M. Esmaelzadeh Moghadm. 2016. Effects of drought stress on physiological characteristics in wheat recombinant inbred lines. *Journal of Plant Process and Function*. 5(15): 123-132.
- Sultana, S., H.M. Naser, N.C. Shil, S. Akhter, and R.A. Begum. 2016. Effect of foliar application of zinc on yield of wheat grown by avoiding irrigation at different growth stages. *Bangladesh Agricultural Research*. 41: 323–334.
- Sun, H.Y., C.M. Liu, X.Y. Zhang, Y.J. Shen, and Y.Q. Zhang. 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 85: 211-218.
- Tabatabaeiyan, J., A. Bakhshande, M.A. Gharine, K.H. Alemisaeid, and A.H. Khoshgoftar. 2013. Interactions between water stress and zinc sulphate foliar application in late stages of growth on the yield and water use efficiency in wheat. *Pajouhesh and Sazandegi*. 100: 8-18. (In Persian).

- Thounaojam, T.C., P. Panda, S. Choudhury, H. K. Patra, and S.K. Panda, 2014. Zinc ameliorates copper-induced oxidative stress in developing rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Protoplasma.* 251: 61–69.
- Tsonev, T., and F.J.C. Lidon. 2012. Zinc in plants. An overview. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 24: 322–333.
- Vahabi, N., Y. Emam, and H. Pirasteh-Anosheh. 2017 Improving wheat growth and yield using chlormequat chloride, salicylic acid and jasmonic acid under water stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 15 (1): 124-135 (In Persian).
- Walia, H., C. Wilson, P. Condamine, X. Liu, A.M. Ismail, and T.J. Close. 2007. Large-scale expression profiling and physiological characterization of jasmonic acid-mediated adaptation of barley to salinity stress. *Plant, Cell and Environment*. 30: 410-421.
- Wang, L., C. Feng, X. Zheng, Y. Guo, F. Zhou, D. Shan, X. Liu, and J. Kong. 2017. Plant mitochondria synthesize melatonin and enhance the tolerance of plants to drought stress. *Journal of Pineal Research*. 63: e12429.
- Wu, H., X. Wu, Z. Li, L. Duan, and M. Zhang. 2012. Physiological evaluation of drought stress tolerance and recovery in cauliflower (*Brassica oleracea* L.) seedlings treated with methyl jasmonate and coronatine. *Journal of Plant Growth Regulation*. 31: 113 – 23.
- Wu, S., C. Hu, Q. Tan, L. Li, K. Shi, Y. Zheng, and X. Sun. 2015. Drought stress tolerance mediated by zinc-induced antioxidative defense and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Acta Physiology Plantarum*. 37: 167-175.
- Yadavi, A., R.S. Aboueshaghi, M.M. Dehnavi, and H. Balouchi. 2014. Effect of micronutrıents foliar application on grain qualitative characteristics and some physiological traits of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under drought stress. *Indian Journal Fundamental Applied Life Science.* 4(4):124-131.
- Zand, B., A. Sorooshzadeh, F. Ghanati, and F. Moradi. 2010. Effect of zinc and auxin foliar application on some anti-oxidant enzymes activity in corn leaf. *Iranian Journal of Plant Biology*. 2: 35-48. (In Persian).

Research Article DOI:

The Effect of Drought Stress on the Biochemical and Antioxidant Activity of Wheat Genotypes under Foliar Treatments of Growth Stimulants and Zinc Nano Chelate

Rita Habibi[1], Suran Sharafi[2*], Soleyman Mohammadi[3], Touraj MirMahmoodi[4] and Saman Yazdan seta[2]

Received: June 2022 , Revised: 18 December 2022, Accepted: 1 January 2023

Abstract

In order to investigate the effect of different foliar application treatments on the biochemical and antioxidant traits of wheat genotypes under different moisture conditions, a factorial split plot experiment was conducted on the basis of a randomized complete block design with three replications in two locations. The main factors of irrigation (normal and water deficit) and the secondary factors were four levels of foliar application (control (without foliar application), jasmonic acid, zinc nano chelate, and succinate) and three different genotypes of barley. The results showed that water deficit stress reduced the content of chlorophyll a, chlorophyll b total compared to normal irrigation conditions by 9.03%, 6.66%, and 7.32%, respectively, and increased the activity of superoxide dismutase, catalase, and glutathione reductase enzymes by 3.29, 3.48 and 50.90 percent respectively. Foliar application of nano chelate increased the amount of chlorophyll a, chlorophyll b, and total, as well as superoxide dismutase, catalase, and glutathione reductase enzymes, 15.45, 15.76, 14.70, 52.63, 11 and 48.14 percent respectively compared to the control. Mihan cultivar had the highest content of photosynthetic pigments and the lowest activity of antioxidant enzymes. The results showed that foliar application of nano-chelate increased the content of proline, glutathione reductase, and grain yield compared to the control treatment in both normal irrigation and water deficit conditions. Also, foliar application of nano zinc chelate in the Mehen cultivar could produce the highest grain yield and the lowest amounts of proline, glycine betaine, and malondialdehyde. Among the irrigation interaction treatments, line 9 had the highest glycine betaine content in both conditions. It can be stated that foliar application of zinc nano-chelate, along with the appropriate variety, can be a solution to improve seed yield under different environmental conditions.

Key words: Jasmonic acid, Micronutrient, Succinate, Water deficit.

1- Ph.D. Student. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.
2- Assistant Prof., Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.
3- Associate Prof., West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research Centre, AREEO, Miyandoab, Iran.
4- Associate Prof., Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.
**Corresponding Authors: sharafi_1352@yahoo.com*