

تأثیر محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف بر برخی صفات بیوشیمیایی و عملکرد گندم در شرایط تنش کم‌آبی

شاهین شاهقلی^۱، سعید سیف‌زاده^{۱*}، اسماعیل حدیدی ماسوله^۱، ناصر شهسواری^۲ و حمیدرضا ذاکرین^۱

^۱ گروه زراعت، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

^۲ گروه تولیدات گیاهی، دانشگاه آزاد اسلامی، حاجی آباد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰)

چکیده

به منظور بررسی اثر محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف بر برخی صفات بیوشیمیایی و عملکرد گندم در شرایط تنش کم‌آبی، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار در ورامین طی دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۵-۱۳۹۶ به اجرا درآمد. عامل اصلی رژیم‌های آبیاری در سه سطح (I1: آبیاری معمول، I2: قطع آبیاری در مرحله شروع رشد ساقه و I3: قطع آبیاری در مراحل شروع رشد ساقه و پُرشدن دانه) و عامل فرعی شامل محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف در هشت سطح (M1: شاهد (بدون محلول-پاشی)، M2: محلول‌پاشی بُر، M3: روی، M4: آهن، M5: روی+بُر، M6: آهن+بُر، M7: روی+آهن و M8: روی+بُر+آهن) بودند. در شرایط آبیاری معمول، دو نوبت آبیاری پاییزه و چهار نوبت آبیاری بهار انجام گرفت. محلول‌پاشی هر یک از عناصر ریزمغذی از منبع سولفات آهن، سولفات بُر و سولفات روی با غلظت ۵ در هزار در دو مرحله ساقه‌دهی و ظهور سنبله انجام گردید. نتایج نشان داد اثر رژیم‌های آبیاری، محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف و اثر متقابل آن‌ها در سطح یک درصد بر محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل، غلظت آنزیم کلروفیلاز، مالون دی‌آلدئید و آبسزیک اسید معنی‌دار بود. همچنین اثر ساده آبیاری و محلول‌پاشی بر غلظت قند کل و عملکرد دانه معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که قطع آبیاری منجر به کاهش کلروفیل کل شد. محلول‌پاشی روی+بُر+آهن (M8) در هر سه سطح رژیم‌های آبیاری منجر به افزایش معنی‌دار کلروفیل کل گردید. بیشترین میزان کلروفیل کل در شرایط آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی روی+بُر+آهن (IIM8) به میزان ۶/۰۳ میلی‌گرم بر گرم برگ تازه به دست آمد. همچنین محلول‌پاشی روی+بُر+آهن در تیمارهای آبیاری (I2) و (I3) (به-ترتیب با میانگین‌های ۵/۲ و ۴/۵۵ میلی‌گرم بر گرم برگ تازه) منجر به افزایش کلروفیل کل نسبت به عدم محلول‌پاشی این عناصر گردید. به طور کلی، استفاده از محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن، روی و بُر ضمن افزایش عملکرد دانه، در شرایط تنش می‌تواند سبب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی در گندم گردد.

کلمات کلیدی: آبسزیک اسید، سولفات روی، کلروفیلاز، گندم، مالون دی‌آلدئید

مقدمه

گندم معمولی یا نان (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین گیاه زراعی ایران و جهان است که بخش قابل‌توجه پروتئین و

در شرایط تنش خشکی، میزان غلظت کلروفیل کاهش می‌یابد. تجزیه کلروفیل در اثر افزایش غلظت آنزیم کلروفیلاز، پراکسیداز و ترکیبات فنلی صورت می‌گیرد. تنش خشکی از طریق افزایش غلظت تنظیم‌کننده‌های رشد از قبیل اتیلن و آبسزیک اسید سبب سنتز آنزیم کلروفیلاز شده و کلروفیل تحت‌تأثیر این آنزیم تجزیه می‌شود (Orabi *et al.*, 2010). با تشدید تنش خشکی تخریب کلروفیل افزایش یافته و به‌عنوان مثال در ذرت، تخریب مولکول‌های کلروفیل در سلول‌های مزوفیل نسبت به سلول‌های غلاف آوندی بیشتر است (Chiango *et al.*, 2021).

مالون دی‌آلدئید یکی از محصولات واکنش بین فسفوپیدها و رادیکال‌های آزاد اکسیژن است و به‌عنوان مهم‌ترین نشانگر جهت ارزیابی میزان تخریب غشای سلولی ناشی از تنش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hua *et al.*, 2018; Mitra *et al.*, 2019). افزایش تولید مالون دی‌آلدئید در اثر تنش خشکی در گندم (Wu *et al.*, 2014) و سویا (Bahrololomi *et al.*, 2019) گزارش شده است.

تحت تنش خشکی دسترسی عناصر غذایی و جذب آن‌ها در محیط ریشه محدود می‌شود. بنابراین اخیراً محلول‌پاشی برگ‌ی این عناصر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش مواد مغذی به‌طور مستقیم در دسترس شاخ و برگ قرار می‌گیرند و اثر آن نسبت به روش کاربرد خاکی سریع‌تر است (Cakmak and Krikby, 2008). مطالعات نشان می‌دهد محلول‌پاشی عناصر غذایی در چندین گونه گیاهی منجر به بهبود رشد گیاهان تحت تنش خشکی شد (Ashraf *et al.*, 2013; Irget *et al.*, 2008). محلول‌پاشی برگ‌ی با عناصر میکرو نظیر روی، بُر، مس، منگنز و آهن به میزان مناسب اثر مثبت و خیلی سریع بر روی گیاهان دارد (Fernandez *et al.*, 2013). دسترسی به روی یکی از عوامل افزایش کمی و کیفی عملکرد در گیاهان زراعی و به‌ویژه در غلات به‌شمار می‌آید (Shahid and Maqsood, 2010). عنصر روی می‌تواند با ایجاد تغییرات رشدی (Wissuwa *et al.*, 2006)، تأثیر در سنتز پیش‌ماده کلروفیل (Said-Al Ahl and Mahmud, 2010)، افزایش

انرژی مردم دنیا را تأمین می‌کند (Arzani and Ashraf, 2017). در کشور ایران نیز گندم از نظر میزان تولید و سطح زیرکشت مهم‌ترین محصول زراعی به‌شمار رفته و افزایش کمی و کیفی عملکرد آن در واحد سطح از مهم‌ترین اولویت‌های تحقیقاتی و اجرایی است (Mojtabaie Zamani *et al.*, 2015). سطح زیر کشت گندم در دنیا در سال ۲۰۱۹، ۲۱۵۹۰۱۹۵۸ هکتار با تولید ۷۶۵۷۶۹۹۳۵ تن و در ایران سطح زیرکشت در همین سال ۸۰۳۵۹۳۷ هکتار با تولید ۱۶۸۰۰۰۰۰ تن بوده است (FAO, 2019).

کمبود آب از شدیدترین تنش‌های زیستی است که بر بهره‌وری محصول و کشاورزی پایدار در سراسر دنیا تأثیرگذار است که منجر به پیامدهای عمده‌ای برای امنیت غذایی و اقتصاد مناطق مختلف جهان شده است (Thirumalaikumar *et al.*, 2018). کم‌آبی باعث کاهش جذب آب توسط سیستم ریشه گیاه، کاهش تعرق، کاهش هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز و همچنین به‌هم‌خوردن موازنه هورمونی در گیاه می‌گردد (Auge *et al.*, 2015). کمبود آب در مناطق مختلف کشور عملکرد و تولید بسیاری از محصولات کشاورزی را شدیداً تحت‌تأثیر قرار داده، به‌طوریکه حفظ، نگهداری و استفاده بهینه از منابع آب در مصارف کشاورزی همراه با افزایش کارایی مصرف آب در تولید انواع محصولات زراعی، از اصول اساسی توسعه کشاورزی بوده و به‌عنوان عامل مهمی در چشم‌انداز توسعه همه‌جانبه کشور در نظر گرفته شده است. در حال حاضر کارایی مصرف آب، کمتر از یک کیلوگرم ماده خشک بر متر مکعب آب مصرفی است و چنانچه همین روند ادامه یابد، احتمالاً دستیابی به چشم‌انداز تولید محصولات کشاورزی در سال ۱۴۰۰ با آب‌های موجود و قابل استحصال، ممکن نخواهد بود. بنابراین با توجه به بحران خشک‌سالی در کشور، استراتژی درازمدت برنامه‌های کشاورزی باید بر مبنای راهکارهای تفاهم و مقابله با خشکی استوار شود (باقری و همکاران، ۱۳۹۵).

رنگیزه کلروفیل به‌طور مستقیم در ارتباط با فتوسنتز بوده و هر گونه کاهش در آن بر میزان فرآیند تأثیر می‌گذارد (Siddique *et al.*, 2016). نتایج تحقیقات نشان داده است که

جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۲ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۴ دقیقه و ۳ ثانیه شرقی است. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح (I1: آبیاری معمول، I2: قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و I3: قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه) به عنوان عامل اصلی و محلول پاشی عناصر کم مصرف در هشت سطح (M1: شاهد (بدون محلول پاشی)، M2: محلول پاشی عنصر بُر، M3: عنصر روی، M4: عنصر آهن، M5: روی + بُر، M6: آهن + بُر، M7: روی + آهن، M8: روی + بُر + آهن) به عنوان عامل فرعی بودند. قبل از کشت، جهت تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی متری خاک محل آزمایش در هر دو سال نمونه برداری انجام گرفت که مشخصات کامل آن در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات هواشناسی منطقه ورامین طی فصل رشد از سازمان هواشناسی استان تهران دریافت شد (جدول ۳). آماده سازی زمین به نحو مطلوب قبل از کشت در پاییز صورت گرفت. فاصله پشته‌ها در هر کرت ۶۰ سانتی متر و طول هر کرت ۵ متر در نظر گرفته شد. فاصله بین کرت‌ها یک متر و بین تکرارها دو متر بود. جهت دستیابی به تراکم مناسب بوته، ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار بذر مصرف گردید. در این تحقیق از بذر رقم سیوند استفاده شد. خصوصیات این رقم در جدول ۲ آورده شده است. محلول پاشی هر یک از عناصر آهن، بر و روی به صورت سولفات آهن، سولفات بُر و سولفات روی با غلظت ۵ در هزار با استفاده از سم پاش پشتی بعد از کالیبره کردن با فشار یک اتمسفر در دو مرحله ساقه دهی و ظهور سنبله انجام گردید. کلیه عملیات زراعی از قبیل واکاری، کوددهی و مبارزه با سن گندم مادر و پوره به نحو مطلوب انجام گرفت.

به منظور محاسبه عملکرد دانه، پس از حذف ۰/۵ متر از حاشیه‌های خطوط کشت مورد نظر در مرحله رسیدگی، کل سنبله‌های برداشت شده از سطح یک متر مربع هر کرت با

متابولیسم پروتئین‌ها (Rion and Alloway, 2004)، تقسیم یاخته (Ebrahimian and Bybordi, 2011)، لقاچ و باروری جنسی (Ebrahimian and Bybordi, 2011) و غیره در تحمل گیاهان به تنش نیز مؤثر باشد و حتی بیش از اغلب عناصر در تحمل به خشکی دخالت دارد (Ahmed et al., 2009). عنصر بُر نیز در فرآیندهای حمل و نقل کربوهیدرات در داخل گیاه و تنظیمات متابولیکی نقش مؤثری دارند. این عنصر برای سنتز پروتئین، تشکیل بذر و دیواره سلولی، جوانه زنی دانه گرده و رشد لوله گرده ضروری است (Liu, 2001). همچنین این عنصر در طول شدن سلول، ساخت اسید نوکلئیک، واکنش هورمون‌ها و کارکرد غشا نقش دارد (کافی و همکاران، ۱۳۸۸). کمبود آهن یکی از اختلالات تغذیه‌ای شایع در بین گیاهان عالی که در خاک‌های آهنکی و قلیایی رشد می‌کنند است، زیرا دامنه مطلوب pH در جذب آهن خاک حدود ۵ تا ۵/۵ است (Bojovic et al., 2012). آهن به دلیل نقش آن به عنوان کوفاکتور در بسیاری از پروتئین‌ها، عنصری ضروری برای گیاهان است (Balk and Pilon, 2011). دسترسی این عنصر به شدت بر رشد و عملکرد گیاهان مؤثر است (Fernandez et al., 2013). نتایج تحقیقات عباسی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد بروز هم‌زمان تنش خشکی و کمبود عنصر روی در مراحل ظهور برگ پرچم و ظهور ریشک باعث کاهش کیفیت و کمیت گندم شد. کاهش عملکرد دانه با قطع آب آبیاری با نتایج پوزیوند و همکاران (۱۳۹۰) در گندم و مددی و فلاح (۱۳۹۷) نیز گزارش شده است. با توجه به اهمیت تنش کمبود آب در عملکرد گیاهان زراعی و اثربخشی محلول پاشی عناصر ریزمغذی در کاهش اثرات منفی تنش کمبود آب، هدف از این پژوهش بررسی اثرات محلول پاشی عناصر ریزمغذی روی، بُر و آهن بر عملکرد دانه و برخی صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گندم در شرایط مختلف آبیاری بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش طی دو سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ و ۱۳۹۶-۱۳۹۷ در داوودآباد ورامین انجام شد. محل آزمایش واقع در عرض

جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه آزمایشی در عمق ۰-۳۰ سانتی متری

سال	بافت خاک	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	EC (ds/m)	pH	کربن		نیترژن کل (%)	فسفر		آهن	روی	بور
							آلی	کل		قابل جذب	قابل جذب			
		(%)					(g)		(ppm)		mg.kg ⁻¹			
اول	لوم رسی لای	۲۰	۲۴	۳۶	۵/۲۹	۸	۰/۸۸	۰/۰۸	۳/۳۶	۳۷۴	۶/۵۲	۳/۸۶	۰/۳	
دوم	رسی لای	۱۲	۴۶	۴۲	۱/۱۶	۷/۹۹	۱/۲	۰/۱	۲/۰۶	۴۰۵	۷/۳	۴/۱	۰/۳۵	

جدول ۲- مشخصات گندم رقم سیوند

نام رقم	منشأ	نپ رشد	دوره رسیدگی	میانگین ارتفاع بوته (cm)	خوابیدگی بوته	میانگین وزن هزار دانه (g)	سازگاری (kg.ha ⁻¹)	در آزمایشات	میانگین عملکرد دانه	بیماری های زنگ زرد و زنگ سیاه	واکس به	زنگ قهوه ای	واکس به بیماری
سیوند	Kauz"S"/Azd	ایرانی	بهاره	زودرس	مقاوم	۹۲	۴۰	۸۶۸۳	مقاوم	نیمه حساس			

جدول ۳- حداکثر و حداقل دما و بارندگی زمان اجرای آزمایش در منطقه ورامین

ماه	۱۳۹۶-۱۳۹۷			۱۳۹۵-۱۳۹۶		
	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)	بارندگی (میلی متر)	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)	بارندگی (میلی متر)
مهر	۳۲	۹	۴۸/۲	۲۷	۱۱	۵۱
آبان	۲۱	۶	۲۴/۵	۱۸	۵	۲۲/۳
آذر	۱۵	۱	۳۲/۵	۱۸	۲	۳۸/۶
دی	۱۴	۰	۷۷	۱۲	-۱	۶۶/۱
بهمن	۷	-۱	۲۵	۸	-۱	۳۹
اسفند	۱۵	۱	۳۸	۱۴	۲	۴۴/۵
فروردین	۱۹	۴	۶۵	۲۰	۴	۹۸
اردیبهشت	۳۲	۴	۷/۸	۳۲	۶	۵۸/۶
خرداد	۳۹	۱۶	۲/۳	۳۸	۱۷	۰
تیر	۴۰	۱۷	۰	۴۰	۱۸	۰

۶۴۷ و ۶۶۳ نانومتر اندازه گیری شد و با فرمول زیر مقادیر کلروفیل مورد سنجش قرار گرفت (Porra et al., 1989; Zhang, 1990).

$$\text{Chl. a (mg/L)} = (12.25 \times A_{663}) - (2.79 \times A_{647})$$

$$\text{Chl. b (mg/L)} = (21.5 \times A_{647}) - (5.1 \times A_{663})$$

$$\text{Chl. a + b (mg/L)} = (7.15 \times A_{663}) - (18.71 \times A_{647})$$

دست خرمن کوبی و بوجاری و پس از آن دانه های به دست آمده توزین و عملکرد در مترمربع و در نهایت در هکتار محاسبه شد. جهت اندازه گیری غلظت کلروفیل a و b، ۰/۲ گرم برگ در استون ۸۰ درصد هموزن گردید. پس از سانتریفیوژ در ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، محلول رویی برداشته و جذب آن در طول موج

به منظور اندازه گیری قند کل، به ۰/۵ گرم بافت گیاه ۵ میلی لیتر استون خالص اضافه شد و هموژن گردید تا پیگمانها حذف شوند. سپس در سانتریفیوژ ۲۵۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد و محلول رویی فیلتر شد. به باقی مانده ۲/۵ میلی لیتر اتانول ۸۰ درصد اضافه و مخلوط گردید. بعد از ۱۵ دقیقه محلول رویی حاصل از سانتریفیوژ در ۲۰۰۰g به مدت ۵ دقیقه برداشت شد. به ۲۰۰ میکرولیتر از این محلول مقدار ۵ میلی لیتر محلول آنترون (انحلال ۱۰۰ میلی گرم آنترون در اسید سولفوریک ۷۰ درصد سرد) اضافه شد. این مخلوط به همراه محلول های استاندارد، همگی در حمام آب گرم ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. سپس سرد شد و جذب آن ها در ۶۳۰ نانومتر خوانده شد و براساس منحنی استاندارد مقدار قند کل ارزیابی گردید (Sunhar, 2010).

اندازه گیری آنزیم کلروفیلز برگ به روش Costa و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد. ابتدا از برگ های بالغ نمونه برداری شد و سپس ۰/۵ گرم برگ از هر نمونه با ۱۰ میلی لیتر استخراج مخلوط شد و به مدت یک ساعت در دمای ۴ درجه سانتی گراد قرار گرفت. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد در دستگاه سانتریفیوژ با تنظیم ۹۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. محلول روشناور جهت سنجش آنزیم کلروفیلز استفاده شد. به این صورت که ۰/۲ میلی لیتر از محلول استخراج برگ ها (محلول روشناور)، ۱ بافر فسفات با pH=۷، ۰/۱۵ درصد تریتون x=100 و ۰/۲ میلی لیتر محلول حاوی کلروفیل در استون به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت و با اضافه کردن ۳ میلی لیتر استون واکنش پایان یافت. کلروفیل تخریب نشده با ۳ میلی لیتر هگزان از این محلول استخراج شد. محلول مذکور به مدت دو دقیقه در ۹۰۰۰ دور و دمای ۴ درجه سانتی گراد در سانتریفیوژ قرار گرفت و سپس توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۶۷ نانومتر با استفاده از استاندارد آنزیم و ضریب خاموشی ۷۶/۷ میلی مول بر سانتی متر فعالیت آنزیم تعیین گردید.

اندازه گیری آبسزیک اسید براساس روش (Zhou et al., 2003) انجام شد. بدین منظور بر ۰/۳ گرم بافت گیاه (برگ)

مقدار ۰/۷۵ میلی لیتر (مقدار ۷۵۰ میکرولیتر) محلول شامل: استون، آب و اسید استیک به ترتیب با نسبت ۱:۱۹:۸ هموژن گردید. محلول توسط دستگاه سانتریفیوژ در ۱۰۰۰ گرم به مدت دو دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول رویی را برداشته و مجدداً توسط ۷۵۰ میکرولیتر از محلول فوق استخراج دوباره انجام گرفت و محلول رویی جدا شده از این دومین استخراج در حرارت معمول خشک شد. بر قسمت خشک شده ۲۰۰ میکرولیتر محلول استونیتریل و آب با نسبت ۸۵:۱۵ حجمی اضافه شد و به آن ۱۲ میلی مول استیک اسید (pH=۳/۳) اضافه گردید. مقدار ۱۰-۱۵ میکرولیتر از محلول به دست آمده بر ستون HPLC ۵۰×۲/۱ میلی متر به قطر داخلی ۳/۵ میکرولیتر از نوع LC/MS با مشخصات (Sunfire و waters USA) وارد شد. عمل شستشوی ستون توسط حلال شامل ۱۲ میلی مول اسید استیک و آب (محلول A) که با (محلول B) تشکیل گرادیان با سرعت ۰/۶ میلی لیتر بر دقیقه شستشو شد. محلول B ۱۰/۱ از استیونیتریل، آب با نسبت ۱۰:۹۰ حجمی ساخته شد. برنامه گرادیان به نحوی تنظیم شد که ۱۰ دقیقه اول از ۱۵٪ محلول B و بعد از آن ۱۰۰٪ محلول B تا ۶/۲ دقیقه بعد وارد مسیر شستشو ستون شود. از استاندارد ABA با غلظت ۲۰۰-۱۰ ng/ml استفاده شد تا پیک خروجی با کالیراسیون مورد استفاده برای سنجش نمونه استخراجی قرار گیرد. براساس سطح زیرمنحنی و موفقیت آن در پیک های خروجی مقدار نمونه مجهول استخراجی تعیین شد (Zhou et al., 2003).

غلطت مالون دی آلدئید (MDA) با روش (Ohkawa et al., 1979) ارزیابی شد. بدین منظور ۰/۲ گرم بافت گیاهی (برگ یا ریشه)، به قطعات کوچک تقسیم و با هموژنایزر در ۲ میلی لیتر محلول تری کلرو استیک اسید ۵ درصد در مجاورت یخ هموژن شد. سپس در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ و محلول رویی برداشت شد. نیم میلی لیتر از این محلول با نیم میلی لیتر از محلول تیو باربیتوریک اسید و تری کلرو استیک ۲۰ درصد مخلوط و در ۹۶ درجه سانتی گراد به مدت ۲۵ دقیقه انکوبه شد. سپس در شرایط سرد در ۱۰۰۰۰

دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفوژ گردید. جذب محلول رویی در ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری شد. از محلول تیوباربیتوریک اسید و تری‌کلرو استیک ۲۰ درصد به‌عنوان شاهد استفاده شد. مقدار MDA با استفاده از منحنی استاندارد تعیین گردید.

داده‌های حاصل از آزمایش، براساس طرح آماری مورد استفاده توسط نرم‌افزار SAS نسخه 9.12 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C صورت گرفت. قبل از تجزیه واریانس جهت همگن بودن واریانس‌ها، آزمون بارتلت برای صفات مورد مطالعه انجام شد.

نتایج و بحث

براساس نتایج تجزیه مرکب، اثر سال (Y)، آبیاری (I) و محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف (M)، اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی و سال × آبیاری در سطح یک درصد بر محتوای کلروفیل a معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل آبیاری و محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف بر محتوای کلروفیل a نشان داد که قطع آبیاری منجر به کاهش محتوای کلروفیل a شد. از سوی دیگر، محلول‌پاشی روی + بُر + آهن (M₈) در هر سه شرایط آبیاری سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل a گردید. بیشترین میزان کلروفیل a در شرایط آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی روی + بُر + آهن (I₁M₈) به میزان ۲/۶۴ میلی‌گرم بر گرم برگ تازه بدست آمد که نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری میزان کلروفیل a ۶۳ درصد افزایش یافت (جدول ۵). Khayatnezhad و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که تنش خشکی انتهای فصل موجب کاهش شاخص کلروفیل برگ در ژنوتیپ‌های مختلف گندم شد. دلیل این کاهش به تولید ROS و کاهش سنتز کلروفیل ناشی از افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز در شرایط تنش ذکر شد (Fathi-Amirkhiz et al., 2011). محتوای پایین کلروفیل تحت شرایط تنش خشکی از نشانه‌های وجود تنش اکسیداتیو است که ممکن است باعث اکسیداسیون نوری رنگ‌دانه‌ها و تخریب

کلروفیل شود. کاهش و یا عدم‌تغییر در سطح کلروفیل طی تنش خشکی در بیشتر گونه‌ها گزارش شده است که وابسته به مدت و شدت خشکی است (Giancarla et al., 2013). کاهش محتوای کلروفیل در شرایط تنش خشکی در نتایج تحقیقات Zafari و همکاران (۲۰۱۷) و مقدسان و همکاران (۱۳۹۴) نیز گزارش شده است. در این آزمایش محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن + روی + بُر سبب افزایش محتوای کلروفیل در شرایط تنش گردید که با توجه به نقش این عناصر در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، کاهش فعالیت آنزیم کلروفیلاز و تشکیل کلروفیل می‌تواند قابل توجیه باشد (Ghasemian et al., 2010; Waraich et al., 2012).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که کلروفیل b تحت تأثیر اثر سال، آبیاری و محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف، اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی و سال × آبیاری در سطح یک درصد قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و محلول‌پاشی حاکی از آن بود که به‌طورکلی قطع آبیاری منجر به کاهش محتوای کلروفیل b شد. محلول‌پاشی روی + بُر + آهن (M₈) در هر سه شرایط آبیاری منجر به افزایش معنی‌دار کلروفیل b گردید. بیشترین میزان کلروفیل b در شرایط آبیاری معمول به همراه محلول‌پاشی روی + بُر + آهن (I₁M₈) به میزان ۲ میلی‌گرم بر گرم برگ تازه بدست آمد که نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری میزان کلروفیل b ۵۱/۱ درصد افزایش یافت. همچنین محلول‌پاشی روی + بُر + آهن در شرایط تیمارهای آبیاری (I₂) و (I₃) نسبت به عدم محلول‌پاشی این عناصر به‌ترتیب منجر به افزایش ۴۵/۴ و ۴۲/۱ درصدی محتوای کلروفیل b گردید (جدول ۵). کمبود آب سبب آسیب به رنگ‌دانه‌ها و پلاستیدها شده و در نهایت باعث کاهش محتوای کلروفیل برگ می‌گردد (Ashraf, 2010). نتایج برخی گزارش‌ها حاکی از کاهش کلروفیل a و b در گیاهان *Phragmites australis* (Pagter et al., 2005) و لطفی *Aeluropus lagopoides* (Mohsenzade et al., 2006) و آقا و همکاران (۱۳۹۶) در ذرت دانه‌ای تحت تنش خشکی است.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب اثر رژیم‌های آبیاری و محلول پاشی عناصر روی، بُر و آهن بر برخی صفات مورد بررسی

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	میانگین مربعات			عملکرد دانه
					کلروفیلاز	قند کل	مالون دی-آلدئید	
سال (Y)	۱	۰/۲۷۸**	۰/۰۷۳**	۰/۸۴۶*	۰/۴۶۸**	۴/۰۷**	۱/۵۲**	۹۲۵۱۷۴/۵۵۳ ^{ns}
تکرار (سال)	۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۷۶	۰/۰۲۳	۰/۱۷	۰/۰۳	۲۵۴۸۷۷۶/۲۴۰
رژیم آبیاری (I)	۲	۶/۲۰۱**	۱/۵۱۴**	۱۲/۶**	۳/۹۰۵**	۱۶۱/۳**	۲۰/۱۶**	۲۵۳۷۲۳۲۹/۸۵۵**
I × Y	۲	۰/۰۵۳**	۰/۰۱۳**	۰/۱۴ ^{ns}	۰/۰۱۴ ^{ns}	۰/۲۳ ^{ns}	۰/۴۸**	۱۴۳۸۶۸/۴۸۰ ^{ns}
خطای اصلی	۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۳۹	۰/۰۵۱	۰/۲۳	۰/۰۰۴	۶۴۰۹۰۸/۴۳۰
محلول پاشی (M)	۷	۲/۷۰۴**	۰/۶۸۲**	۶/۰۷۸**	۱/۰۵۶**	۳۸/۵۵**	۲۱/۱۷**	۱۹۲۵۷۴۹/۰۶۲**
I × M	۱۴	۰/۱۲۵**	۰/۰۳۱**	۰/۳۷۵**	۰/۰۶۲*	۰/۴۷ ^{ns}	۰/۲۱**	۶۷۸۷۶/۴۵۵ ^{ns}
M × Y	۷	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۴۳ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۱۱۵۲۷۷/۷۴۱ ^{ns}
I × M × Y	۱۴	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۳۳ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۷۹۷۶۸/۶۹۰ ^{ns}
خطای فرعی	۸۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۴۱	۰/۰۳۱	۰/۴۲	۰/۰۳	۷۸۲۱۱/۴۸۰
ضریب تغییرات (%)	-	۲/۷	۲/۹	۴/۷	۶/۷	۵/۱	۴/۸	۳/۵

ns, * و **: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطوح ۵ و ۱ درصد

مرکب آزمایش نشان داد که در کل قطع آبیاری منجر به کاهش کلروفیل کل شد. محلول پاشی روی + بر + آهن (M₈) در هر سه سطح رژیم‌های آبیاری منجر به افزایش معنی دار کلروفیل کل گردید. بیشترین میزان این صفت در شرایط آبیاری معمول به همراه محلول پاشی روی + بُر + آهن (I₁M₈) به میزان ۶/۰۳ میلی گرم بر گرم برگ تازه بدست آمد. همچنین محلول پاشی روی + بُر + آهن در تیمارهای آبیاری (I₂) و (I₃) (به ترتیب با میانگین‌های ۵/۲ و ۴/۵۵ میلی گرم بر گرم برگ تازه) نسبت به عدم محلول پاشی این عناصر منجر به افزایش ۴۵/۷ و ۴۰/۹ درصدی کلروفیل کل گردید (جدول ۵). به طور کلی به نظر می‌رسد که کاهش غلظت کلروفیل تحت تنش خشکی به علت افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن باشد که این رادیکال‌های آزاد باعث پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه این رنگیزه می‌شود (Sharifa and Muriefah, 2015). کاهش میزان شاخص کلروفیل با افزایش تنش خشکی با نتایج تحقیقات

عنصر روی می‌تواند با ایجاد تغییرات رشدی (Wissuwa et al., 2006)، تأثیر در سنتز پیش ماده کلروفیل (Said-Al Ahl and Mahmood, 2010)، افزایش متابولیسم پروتئین‌ها (Rion and Alloway, 2004)، تقسیم یاخته، لقاح و باروری جنسی (Ebrahimian and Bybordi, 2011) و غیره در تحمل گیاهان به تنش نیز مؤثر باشد و حتی بیش از اغلب عناصر در تحمل به خشکی دخالت دارد (Ahmed et al., 2009). در یک تحقیق استفاده از نانو اکسید روی در گندم توانست با افزایش ساخت پرولین و پیشگیری از تخریب کلروفیل موجب کاهش اثرات سو تنش کم آبی و بهبود شرایط رشدی گیاهان گردد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷).

بر اساس نتایج تجزیه مرکب، اثر رژیم‌های آبیاری (I) و محلول پاشی عناصر کم مصرف (M)، اثر متقابل (I×M) و (I×Y) در سطح یک درصد و اثر سال (Y) در سطح پنج درصد بر کلروفیل کل معنی دار گردید (جدول ۴). نتایج تجزیه

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم‌های آبیاری و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی بر صفات مورد بررسی

آبیاری	محلول‌پاشی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کلروفیلاز (میکروگرم بر گرم وزن تازه)	مالون دی‌آلدئید (میکرومول بر گرم بافت)	آبسیزیک اسید (نانومول بر گرم وزن تازه)		
	شاهد	۲/۶۴ ⁱ	۱/۳۲ ⁱ	۳/۹۴ ^{jk}	۲/۶۵ ^{gh}	۴/۰۱ ^{cd}	۹/۰۷ ^m		
	عنصر بر (B)	۲/۷ ^{ij}	۱/۳۵ ^{ij}	۴/۰۵ ^{ij}	۲/۵۲ ^{hi}	۳/۷۲ ^{def}	۹/۴۲ ^l		
	عنصر روی (Zn)	۲/۹۳ ^g	۱/۴۷ ^{fg}	۴/۳۹ ^{gh}	۲/۶۷ ^{fgh}	۳/۲۵ ^{e-h}	۱۰/۷۶ ^{jk}		
آبیاری	عنصر آهن (Fe)	۳/۱۷ ^e	۱/۵۹ ^e	۴/۷۳ ^c	۲/۴۱ ^{ij}	۲/۹۳ ^{ghi}	۱۰/۶۸ ^k		
معمول	Zn+B	۳/۶۱ ^c	۱/۸ ^c	۵/۴۱ ^c	۲/۱۸ ^{klm}	۲/۲۷ ^{ijk}	۱۱/۲۲ ⁱ		
	Fe+B	۳/۳۸ ^d	۱/۶۱ ^d	۵/۱ ^d	۲/۳ ^{kl}	۱/۹۳ ^{ijkl}	۱۱/۲۱ ⁱ		
	Fe+Zn	۳/۸۶ ^b	۱/۹۳ ^b	۵/۷۷ ^b	۲/۰۶ ^m	۱/۷ ^{kl}	۱۳/۵۴ ^e		
	Fe+Zn+B	۴/۰۱ ^a	۲ ^a	۶/۰۳ ^a	۲/۱۵ ^{lm}	۱/۴۷ ^l	۱۳/۶۹ ^{de}		
	شاهد	۲/۴ ^l	۱/۱۹ ^l	۳/۵۷ ^l	۲/۹۴ ^{bcd}	۴/۹ ^b	۹/۳۹ ^l		
	عنصر بر (B)	۲/۴۸ ^{kl}	۱/۲۴ ^k	۳/۷۲ ^{kl}	۳/۰۲ ^{bc}	۴/۶۳ ^{bc}	۹/۲۳ ^{lm}		
	عنصر روی (Zn)	۲/۶۳ ⁱ	۱/۳۲ ^j	۳/۹۹ ^j	۲/۸۶ ^{c-f}	۴/۱۷ ^{cd}	۱۰/۹۵ ^j		
قطع آبیاری	عنصر آهن (Fe)	۲/۸۲ ^h	۱/۴۲ ^{gh}	۴/۲۶ ^{hi}	۲/۷۳ ^{efg}	۳/۷۷ ^{def}	۱۰/۹۲ ^j		
در شروع	Zn+B	۲/۷۵ ^{hi}	۱/۳۸ ^{hi}	۴/۱۵ ^{ij}	۲/۳۹ ^{ij}	۳/۲۲ ^{e-h}	۱۱/۴۹ ^h		
رشد ساقه	Fe+B	۲/۹۹ ^{fg}	۱/۵ ^f	۴/۵ ^{fg}	۲/۴۷ ^{hij}	۲/۵۷ ^{hij}	۱۱/۶۱ ^h		
	Fe+Zn	۳/۱۴ ^e	۱/۵۷ ^e	۴/۷ ^{ef}	۲/۳۶ ^{jk}	۲/۰۴ ^{kl}	۱۳/۲۳ ^f		
	Fe+Zn+B	۳/۴۶ ^d	۱/۷۳ ^d	۵/۲ ^{cd}	۲/۳۳ ^{i-l}	۲ ^{ijkl}	۱۳/۲۸ ^f		
	شاهد	۲/۱۴ ⁿ	۱/۰۷ ⁿ	۳/۲۳ ^m	۲/۹۶ ^{bcd}	۵/۸۴ ^a	۱۱/۶ ^h		
	عنصر بر (B)	۲/۲۴ ^m	۱/۱۳ ^m	۳/۶۲ ^l	۳/۴۴ ^a	۵/۲۶ ^{ab}	۱۱/۶۴ ^h		
قطع آبیاری	عنصر روی (Zn)	۲/۴۲ ^{kl}	۱/۲۱ ^{kl}	۳/۶۴ ^l	۳/۰۹ ^b	۴/۵۴ ^{bc}	۱۳/۸۴ ^d		
در مرحله	عنصر آهن (Fe)	۲/۶۴ ⁱ	۱/۳۲ ^j	۴ ^j	۲/۹۸ ^{bcd}	۳/۹۲ ^{cde}	۱۲/۵۶ ^g		
شروع رشد	Zn+B	۲/۵۱ ^k	۱/۲۶ ^k	۳/۵۹ ^l	۲/۷۸ ^{d-f}	۳/۴۸ ^{d-g}	۱۴/۳۲ ^c		
ساقه و پر	Fe+B	۲/۷۱ ^{ij}	۱/۳۶ ^{ij}	۴/۰۷ ^{ij}	۲/۸۹ ^{b-e}	۳/۱۷ ^{fgh}	۱۳/۱۱ ^f		
شدن دانه	Fe+Zn	۲/۹۴ ^g	۱/۴۷ ^f	۴/۶۷ ^{ef}	۲/۶۳ ^{gh}	۲/۹۸ ^{ghi}	۱۵/۹۲ ^b		
	Fe+Zn+B	۳/۰۵ ^f	۱/۵۲ ^f	۴/۵۵ ^{efg}	۲/۷۳ ^{efg}	۲/۴۲ ^{ijk}	۱۶/۵ ^a		
	LSD 5%	±۰/۰۸	±۰/۰۵	±۰/۲۳	±۰/۲۰	±۰/۷۴	±۰/۱۹		

در هر ستون حروف مشابه بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در بین میانگین تیمارها هستند.

1986). بنابراین کاهش ذخیره کلروفیل در برگ‌ها به علت مهار مراحل مختلف بیوسنتز کلروفیل است و مهار بیوسنتز کلروفیل احتمالاً به‌واسطه آلفا-آمینو لیوولینیک اسید و مهار تشکیل پروتو کلروفیل ردوکتاز است (Vassilev and Yordanov, 1997). همچنین آهن نقش مهمی در سنتز rRNA و mRNA کلروپلاست نیز ایفا می‌کند که این‌ها سنتز کلروفیل را تنظیم می‌کنند (Noort and Wallace, 1963). بنابراین آهن به میزان

تاتاری و همکاران (1392) در سه نوع چمن، مددی و فلاح (1397) و یوسفی و همکاران (1396) در ذرت مطابقت دارد. در این آزمایش کمبود آهن منجر به کاهش کلروفیل گردید. در تفسیر می‌توان بیان کرد که آهن جز متابولیک آنزیم کاپروپورفینوژن اکسیداز است (Chereskin and Castelfrance, 1982). این آنزیم در بیوسنتز آلفا-آمینو لیوولینیک اسید (ALA) که پیش‌ساز کلروفیل است، دخیل است (Marschner,

آزیم کلروفیلز تحت شرایط تنش باشد (قنبری و همکاران، ۱۳۹۵). عنصر روی برای تشکیل آنزیم‌های گیاهی مورد نیاز است. علاوه بر این بسیاری از واکنش‌های آنزیمی را نیز فعال می‌نماید (Vitosh *et al.*, 1994).

بر اساس نتایج تجزیه مرکب، اثر سال (Y)، رژیم‌های آبیاری (I) و محلول پاشی عناصر کم مصرف (M)، اثر متقابل (I×M) و (I×Y) در سطح یک درصد بر بیومارکر مالون دی‌آلدئید معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌های اثر متقابل رژیم‌های آبیاری و محلول پاشی عناصر کم مصرف بر محتوای مالون دی‌آلدئید نشان داد که در کل قطع آبیاری منجر به افزایش غلظت مالون دی‌آلدئید شد. محلول پاشی روی + بُر + آهن (M₈) در هر سه رژیم آبیاری منجر به کاهش معنی‌دار مالون دی‌آلدئید گردید. بیشترین میزان این صفت در شرایط قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه، بدون محلول پاشی عناصر (I₃M₁) به میزان ۵/۸۴ میکرومول بر گرم بافت بدست آمد. همچنین محلول پاشی روی + بُر + آهن در تیمارهای آبیاری (I₂) و (I₃) نسبت به عدم محلول پاشی این عناصر به ترتیب منجر به کاهش ۵۹/۳ و ۵۸/۶ درصدی بیومارکر مالون دی‌آلدئید شد (جدول ۵). وقتی تنش اکسیداتیو رخ می‌دهد، پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع لیپیدها افزایش می‌یابد. در اثر حمله رادیکال‌های آزاد به لیپیدها، آلدئیدها، آلدئیدهای گوناگونی از جمله مالون دی‌آلدئید ایجاد می‌شوند (قربانی قورذی و لادن مقدم، ۱۳۹۴). افزایش غلظت مالون دی‌آلدئید و دی‌هیدروکسی گوانوزین ناشی از پراکسیداسیون لیپیدها و تخریب DNA دلالت بر ایجاد رادیکال‌های آزاد در بافت است. افزایش این دو بیومارکر می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز باشد (Bingru and Jinmin, 2000). تنش اکسیداتیو در هنگام تنش خشکی و افزایش رادیکال‌های آزاد با کاهش دفاع آنتی‌اکسیدانی منجر به آسیب بافت‌ها، لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک و غلظت بیومارکرهایی چون مالون دی‌آلدئید، هیدروکسی دی‌اکسی گوانوزین افزایش می‌یابد (Mates *et al.*, 1999).

زیادی در کلروپلاست و میتوکندری سلول‌های گیاهی مورد نیاز است. به‌عنوان کوفاکتور در چندین پروتئین در زنجیره انتقال الکترون نقش دارد و با گوگرد تشکیل پروتئین آهن-گوگرد را می‌دهد. بیوستنز پروتئین آهن-گوگردار به گوگرد (در فرم سیستئین) و آهن نیازمند است و کمبود آهن منجر به کاهش میزان کلروفیل می‌گردد (Astolfi *et al.*, 2010). در مطالعه‌ای محلول پاشی عنصر روی باعث افزایش میزان جذب خالص، افزایش میزان کلروفیل و کاروتنوئید در برگ گردید (Ghatavi *et al.*, 2012).

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که کلروفیلز تحت تأثیر اثر سال (Y)، رژیم‌های آبیاری (I) و محلول پاشی عناصر کم مصرف (M) در سطح یک درصد و اثر متقابل (I×M) در سطح پنج درصد قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل (I×M) حاکی از آن بود که در کل قطع آبیاری منجر به افزایش کلروفیلز شد. محلول پاشی روی + بُر + آهن (M₈) در هر سه رژیم آبیاری منجر به کاهش معنی‌دار کلروفیلز گردید. بیشترین میزان این صفت در قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه به همراه محلول پاشی عنصر بُر (I₃M₂) بدست آمد و کمترین میزان این صفت در شرایط آبیاری معمول به همراه محلول پاشی روی + بُر + آهن (I₁M₈) و شرایط آبیاری معمول به همراه محلول پاشی روی + آهن (I₁M₇) حاصل شد (جدول ۵). گزارش‌های زیادی مبنی بر تأثیر کمبود آب از چند نوبت تا تنش‌های شدید در رابطه با مختل شدن فرآیندهای فیزیولوژی گیاهان و تغییر در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و نیتروژن، تغییر در ساختمان پروتئین‌ها و فعالیت آنزیم‌ها وجود دارد (Levitt, 1980). عوامل کاهش‌دهنده میزان کلروفیل در شرایط تنش می‌تواند به افزایش میزان فعالیت آنزیم کلروفیلز و حمله رادیکال‌های آزاد ناشی از تنش اکسیداتیو اشاره کرد (Loggini *et al.*, 1999). نتایج مطالعه قنبری و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که فعالیت آنزیم کلروفیلز در شرایط تنش افزایش یافت. بنابراین کاهش مقدار کلروفیل مشاهده‌شده در این تحقیق احتمالاً می‌تواند به دلیل اختلال در جذب عناصر غذایی، افزایش تخریب اکسیداتیو کلروفیل و یا افزایش فعالیت

در این آزمایش محلول پاشی روی + بُر + آهن در هر سه رژیم آبیاری منجر به کاهش معنی دار مالون دی آلدئید گردید و بیشترین میزان این صفت در شرایط عدم محلول پاشی حاصل گردید. بنابراین چنین به نظر می رسد که محلول پاشی روی + بُر + آهن می تواند نمایانگر مسئله القای سیستم دفاع آنتی اکسیدانی با از بین بردن رادیکال های آزاد به طور مستقیم و یا توسط آنزیم های آنتی اکسیدانی باشد که خسارت ناشی از گونه های فعال را کاهش دهد و در نتیجه پراکسیداسیون لیپیدهای غشا کاهش یابد و این امر منجر به کاهش مالون دی آلدئید به عنوان فرآورده حاصل از پراکسیداسیون لیپیدهای غشا باشد. بنابراین به نظر می رسد محلول پاشی عناصر روی + بر + آهن با پاک سازی رادیکال های آزاد از اکسیداسیون چربی ها به خصوص در شرایط تنش خشکی جلوگیری نموده و مانع افزایش مالون دی آلدئید شود (فتحی و همکاران، ۱۳۸۸).

بر اساس نتایج تجزیه مرکب، اثر سال (Y)، رژیم های آبیاری (I) و محلول پاشی عناصر کم مصرف (M) در سطح یک قرار گرفت (جدول ۴). براساس نتایج مقایسه میانگین های اثر متقابل آبیاری و محلول پاشی، به طور کلی قطع آبیاری منجر به افزایش معنی دار قند کل شد. کمترین قند کل در شرایط آبیاری معمول و بیشترین میزان این صفت در شرایط قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه (I_3) حاصل شد (جدول ۴). محلول پاشی عناصر منجر به افزایش معنی دار قند کل گردید. بیشترین میزان این صفت در تیمار محلول پاشی روی + بُر + آهن (M_8) حاصل گردید. به طوریکه محلول پاشی روی، بُر و آهن (M_8) نسبت به عدم محلول پاشی (M_1) منجر به افزایش ۳۹/۲ درصدی قند کل گردید (جدول ۶). نتایج چندین مطالعه بیانگر تجمع کربوهیدرات ها در زمان تنش خشکی (Zafari et al., 2017)، در گونه های چوبی نظیر *Citrus* (Wu and Xia, 2006) و *Macadamia cultivars* (Yooyongwech et al., 2013) بود. وجود روی بر موازنه میان تولید نشاسته و پروتئین دانه (Rion and Alloway, 2004) و افزایش میزان قندهای محلول (Rabie et al., 1992) نیز تأثیرگذار است. Brown و همکاران (۱۹۹۳) اذعان داشتند که در اثر مصرف آهن و روی، مقدار کل کربوهیدرات، نشاسته و پروتئین دانه بالا می رود. نقش روی به عنوان بخش فلزی یا به عنوان فعال کننده بعضی از آنزیم ها مطرح است.

نتایج تجزیه مرکب نشان داد که اثر رژیم های آبیاری و محلول پاشی عناصر ریزمغذی بر عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی دار گردید (جدول ۴). براساس مقایسه میانگین های اثر رژیم های آبیاری، قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن

در این آزمایش محلول پاشی روی + بُر + آهن در هر سه رژیم آبیاری منجر به کاهش معنی دار مالون دی آلدئید گردید و بیشترین میزان این صفت در شرایط عدم محلول پاشی حاصل گردید. بنابراین چنین به نظر می رسد که محلول پاشی روی + بُر + آهن می تواند نمایانگر مسئله القای سیستم دفاع آنتی اکسیدانی با از بین بردن رادیکال های آزاد به طور مستقیم و یا توسط آنزیم های آنتی اکسیدانی باشد که خسارت ناشی از گونه های فعال را کاهش دهد و در نتیجه پراکسیداسیون لیپیدهای غشا کاهش یابد و این امر منجر به کاهش مالون دی آلدئید به عنوان فرآورده حاصل از پراکسیداسیون لیپیدهای غشا باشد. بنابراین به نظر می رسد محلول پاشی عناصر روی + بر + آهن با پاک سازی رادیکال های آزاد از اکسیداسیون چربی ها به خصوص در شرایط تنش خشکی جلوگیری نموده و مانع افزایش مالون دی آلدئید شود (فتحی و همکاران، ۱۳۸۸).

بر اساس نتایج تجزیه مرکب، اثر سال (Y)، رژیم های آبیاری (I) و محلول پاشی عناصر کم مصرف (M)، اثر متقابل ($I \times M$), ($I \times Y$) و ($I \times M \times Y$) در سطح یک درصد بر آبسزیک اسید معنی دار گردید (جدول ۴). نتایج تجزیه مرکب آزمایش نشان داد که در کل قطع آبیاری منجر به افزایش ABA شد. محلول پاشی روی + بر + آهن (M_8) در هر سه رژیم آبیاری منجر به افزایش معنی دار ABA گردید. بیشترین میزان این صفت در شرایط قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه به همراه محلول پاشی روی + بر + آهن (I_3M_8) بدست آمد که نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری میزان ABA، ۴۲/۲ درصد افزایش یافت. کمترین غلظت ABA در تیمارهای (I_1M_1), (I_1M_2), (I_2M_1) و (I_2M_2) حاصل گردید (جدول ۵). نتایج مطالعه ای بیانگر آن بود که اثر متقابل تنش خشکی و کاربرد عنصر روی بر روی ایندول استیک اسید، آبسزیک اسید، اسید جیبرلیک گندم معنی دار بود و تنش خشکی منجر به افزایش میزان آبسزیک اسید گردید (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷). افزایش آبسزیک اسید نقش حیاتی این هورمون را در مکانیسم های مقابله با خشکی گیاهان مقاوم تأیید می کند و در مطالعات متعدد بر روی گیاهانی همانند گندم

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر ساده رژیم‌های آبیاری و محلول پاشی عناصر ریزمغذی بر میزان قند کل و عملکرد دانه

صفات	قند کل (mg/g)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
رژیم‌های آبیاری		
آبیاری معمول	۱۰/۹ ^c	۶۷۸۸ ^a
قطع آبیاری در شروع رشد ساقه	۱۲/۶۳ ^b	۶۱۲۴ ^b
قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه	۱۴/۵۳ ^a	۵۳۳۶ ^c
LSD 5%	±۰/۲۲	±۳۱۹/۶
محلول پاشی		
شاهد	۱۰/۸ ^g	۵۴۹۸ ^f
عنصر بر (B)	۱۱/۲ ^f	۵۸۸۷ ^e
عنصر روی (Zn)	۱۱/۹ ^e	۵۹۸۴ ^{de}
عنصر آهن (Fe)	۱۲/۲ ^e	۵۹۷۴ ^{de}
Zn + B	۱۳/۳ ^c	۶۱۰۷ ^{cd}
Fe + B	۱۲/۷ ^d	۶۲۸۷ ^{bc}
Fe + Zn	۱۴/۳ ^b	۶۳۷۶ ^{ab}
Fe + Zn + B	۱۵ ^a	۶۵۵۰ ^a
LSD 5%	±۰/۴۲	±۱۸۵/۴

در هر ستون حروف مشابه بیانگر عدم وجود تفاوت معنی دار در بین میانگین تیمارها هستند.

دانه منجر به کاهش معنی دار عملکرد دانه گردید. بیشترین عملکرد دانه متعلق به تیمار آبیاری معمول با میانگین ۶۷۸۸ کیلوگرم در هکتار بود. عملکرد دانه در شرایط قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه نسبت به شرایط آبیاری معمول به ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد کاهش یافت (جدول ۶). کمبود آب آبیاری بسته به نوع رقم، مرحله رشد، شدت و طول مدت تنش باعث کاهش عملکرد دانه می شود. اثر منفی کمبود آب بر تقسیم سلولی (Ge et al., 2012)، کاهش سرعت ظهور برگ (George et al., 2013)، پیری زودرس در اثر انتقال آب از برگ‌های پیر به برگ‌های جوان (Warren et al., 2011)، جذب تابش کمتر به علت از بین رفتن برگ‌ها (Ge et al., 2012)، کاهش کارایی مصرف تابش (Earl and Davis, 2003)، دلایل اصلی کاهش عملکرد در شرایط کمبود آب هستند. علاوه بر این تنش‌های محیطی تعادل بین گونه‌های فعال اکسیژن و دفاع ضد اکسند در بخش‌های مختلف گیاه را مختل می کند

(Bai and Sui, 2006). اکسیژن فعال فتوستیزی به طور بالقوه دارای پتانسیلی است که با بسیاری از ترکیبات سلولی واکنش داده و سبب خسارت به غشاء و سایر ماکرومولکول‌های ضروری از قبیل رنگ‌دانه‌های فتوستیزی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها می شود که این امر نیز باعث کاهش عملکرد در گیاه می شود (Blokhina et al., 2002; Fu and Huang, 2001). کم‌آبی در گیاهان، حجم سلول، تقسیم سلولی، بزرگ شدن سلول و وزن ماده خشک گیاهی را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش آن‌ها نسبت به شرایط عدم تنش می شود (Sirousmehr et al., 2014). کاهش عملکرد دانه با قطع آب آبیاری با نتایج پرزیوند و همکاران (۱۳۹۰) در گندم، لطفی آقا و همکاران (۱۳۹۶)، مددی و فلاح (۱۳۹۷)، یوسفی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد.

نتایج مقایسه میانگین‌های اثر محلول پاشی عناصر ریزمغذی بر عملکرد دانه نشان داد که تیمار Fe+Zn+B با میانگین ۶۵۴۹

نتیجه گیری

براساس نتایج حاصل از این تحقیق، اعمال تنش خشکی (قطع آبیاری در شروع رشد ساقه و پرشدن دانه) سبب تغییرات در کلیه صفات بیوشیمیایی و همچنین کاهش معنی دار عملکرد دانه گردید. به طوریکه تنش خشکی از طریق کاهش محتوای کلروفیل (a و b) سبب کاهش عملکرد دانه گردید. محلول پاشی توأم عناصر روی، بُر و آهن سبب افزایش معنی دار عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین محلول پاشی عناصر ریزمغذی سبب افزایش محتوای کلروفیل هم در شرایط آبیاری معمول و هم در شرایط تنش (I2 و I3) گردید. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق محلول پاشی این عناصر ضمن بهبود شرایط فیزیولوژیکی و عملکرد نهایی گندم، می تواند سبب کاهش اثرات فیزیولوژیکی تنش گردد.

کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد که نسبت به تیمار شاهد (عدم مصرف) ۱۷ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶). سیلسپیور (۱۳۸۶) نتیجه گرفت که با مصرف توأم کودهای آهن و روی میزان عملکرد گندم به طور متوسط ۸۶۷ کیلوگرم در هکتار افزایش یافته است. همچنین او علت این افزایش عملکرد را بالارفتن میزان نشاسته و پروتئین دانه دانست. مجیدی و ملکوتی (۱۳۷۷) نیز با بررسی اثر منابع مختلف آهن در گندم گزارش کردند که با مصرف سولفات آهن عملکرد گندم ۱۲ درصد افزایش می یابد. ضیائیان و ملکوتی (۱۳۷۹) و Hemantaranjan و Garg (۱۹۸۸) نیز مشاهده کردند که در اثر مصرف آهن، روی و منگنز، تعداد دانه در خوشه، وزن هزار دانه و در نهایت عملکرد به صورت معنی داری افزایش می یابد.

منابع

- باقری، حمیدرضا، قرینه، محمد حسین، بخشنده، عبدالمهدی، طایی، جواد، محنت کش، عبدالمحمد. و اندرزیان، بهرام (۱۳۹۵). بررسی تأثیر تنش کم آبی و مقادیر مختلف کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.). تنش های محیطی در علوم زراعی، ۱۹(۱)، ۱۴-۱. <https://doi.org/10.22077/escs.2016.295>
- تاتاری، مریم، فتوحی قزوینی، رضا، اعتمادی، نعمت الله، احدی، علی محمد، و موسوی، سید اصغر (۱۳۹۲). بررسی برخی پاسخ های فیزیولوژیکی سه نوع چمن در شرایط تنش خشکی. پژوهش های تولید گیاهی (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۰(۱)، ۶۳-۸۷. DOI: 20.1001.1.23222050.1392.20.1.5.8
- پرزبوند، علی، قوشچی، فرشاد، ممیزی، محمدرضا. و توحیدی مقدم، حمیدرضا. (۱۳۹۰). اثر محلول پاشی عنصر روی و کود نیتروژن بر عملکرد و برخی شاخص های کیفی دانه گندم در شرایط تنش خشکی. تنش های محیطی در علوم گیاهی، ۳(۱)، ۶۹-۵۵.
- پوستینی، کاظم، سی و سه مرده، عادل، زواره، محسن، و مداح حسینی، شهاب (۱۳۸۴). عملکرد گیاهان زراعی فیزیولوژی و فرآیندها، انتشارات دانشگاه تهران.
- سیلسپیور، محسن (۱۳۸۶). بررسی اثرات مصرف عناصر آهن و روی در خصوصیات کمی و کیفی گندم آبی و تعیین حد بحرانی آن ها در خاک های دشت ورامین. پژوهش و سازندگی، ۷۶، ۱۳۳-۱۲۳.
- عباسی، امین، شکاری، فریبرز، و لطفی، رامین (۱۳۹۷). اثر شرایط مختلف رطوبتی خاک و کاربرد نانواکسید روی بر تغییرات فیتوهورمونی و کیفیت تغذیه ای گندم نان (*Triticum aestivum*). پژوهش های زراعی ایران، ۱۶(۳)، ۵۸۲-۵۶۹. <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i3.67795>
- ضیائیان، عبدالحسین. و ملکوتی، محمدجواد (۱۳۷۹). بررسی گلخانه ای اثرات مصرف آهن، منگنز، روی و مس بر تولید گندم در خاک های شدیداً آهکی استان فارس. تغذیه متعادل گندم، مجموعه مقالات، گردآورنده: محمدجواد ملکوتی، نشر آموزش کشاورزی، تهران، ایران.

- فتحی، قدرت اله. و عنایت قلی زاده، محمدرضا. (۱۳۸۸). تأثیر کودهای کم مصرف آهن، روی و مس بر رشد و عملکرد ارقام جو در شرایط آب و هوایی خوزستان. *فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱(۱)، ۴۱-۲۸.
- قربانی قوژدی، حسن، و لادن مقدم، علی رضا. (۱۳۹۴). مقدمه‌ای بر تنش‌های اکسایشی و کرنش‌های گیاهی. انتشارات دواوین.
- قنبری، فردین، امیری نژاد، علی، سیاری، محمد، و کردی، سجاد (۱۳۹۵). اثر اسید سالیسیلیک بر مقاومت به تنش‌های شوری و قلیائیت گیاه فلفل شیرین. *مجله پژوهش‌های گیاهی (علمی)*، ۲۹ (۱)، ۱۴۰۱-۱۳۰.
- <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1395.29.1.11.3>
- کافی، محمد، زند، اسکندر، مهدوی دامغانی، مجید، عباسی، فروغ و شریفی حمیدرضا. (۱۳۸۸). فیزیولوژی گیاهی ۱. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۱۹۶-۲۰۱.
- لطفی آقا، منا، مرعشی، سیدکیوان، و بابایی نژاد، تیمور (۱۳۹۶). اثر مقادیر پلیمرسوپر جاذب و کم آبیاری بر عملکرد و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی ذرت دانه‌ای (*Zea mays L.*). *فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۹(۳۴)، ۹۷-۱۰۹.
- مجیدی، عزیز و ملکوتی، محمدجعفر (۱۳۷۷). اثر مقادیر و منابع مختلف روی بر عملکرد و جذب روی در گندم آبی. *جلد ۱۲، خاک و آب، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.*
- مددی، الهام و فلاح، سیف اله. (۱۳۹۷). اثر پرولین و اسید سالیسیلیک بر پارامترهای فیزیولوژیکی و عملکرد ذرت سیلویی تحت رژیم‌های مختلف رطوبتی. *تولید فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۸(۱)، ۲۸-۱۵. <http://dx.doi.org/10.29252/jcpp.8.1.15>
- مقدسان، شیوا، صفی پور افشار، اکبر و سعید نعمت پور، فاطمه (۱۳۹۴). نقش میکوریزا در تحمل به خشکی همیشه بهار (*Calendula officinalis L.*). *اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی (علوم کشاورزی)*، ۹(۴)، ۵۳۲-۵۲۱.
- یوسفی، مه‌ری، نصراله زاده اصل، وحید، و محرم نژاد، سجاد (۱۳۹۶). بررسی عملکرد دانه، میزان کلروفیل، مواد اسمولیتی، پلی فنول کل و فعالیت آنزیم کاتالاز ذرت در پاسخ به تنش خشکی. *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۱۲(۴۶)، ۱۴-۱.
- DOR: 20.1001.1.76712423.1396.12.46.1.1
- Ahmed, N., Fiaz, A., Abid, M., & Amanullah, M. (2009). Impact of zinc fertilization on gas exchange characteristics and water use efficiency of cotton crop under arid environment. *Pakistan Journal of Botany*, 41 (5), 2189-2197.
- Arzani, A., & Ashraf, M. (2017). Cultivated ancient wheats (*Triticum spp.*): A potential source of health-beneficial food products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3), 477-488. DOI: 10.1111/1541-4337.12262.
- Ashraf, M. (2010). Inducing drought tolerance in plants: Some recent advance. *Biotechnology Advances*, 28, 169-183.
- Ashraf, M., Akram, N. A., Al-Qurainy, F., & Foolad, M. R. (2013). Drought tolerance: Roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. *Advances in Agronomy*, 111, 249-296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387689-8.00002-3>.
- Astolfi, S., Zuchi, S., Hubberten, H. M., Pinton, R., & Hoefgen, R. (2010). Supply of sulphur to S-deficient young barley seedlings restores their capability to cope with iron shortage. *Journal of Experimental Botany*, 61, 799-806.
- Auge, R. M., Toler, H. D., & Saxton, A. M. (2015). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alter stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: A meta-analysis. *Mycorrhiza*, 25(1): 13-24.
- Bahrololomi, S., Raeini Sarjaz, M., & Pirdashti, H. (2019). The effect of drought stress on the activity of antioxidant enzymes, malondialdehyde, soluble protein and leaf total nitrogen contents of soybean (*Glycine max L.*). *Environmental and Experimental Botany*, 12(1), 17-28. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1316.1271>.
- Bai, I., & Sui, F. (2006). Effect of soil drought stress on leaf of maize. *Pedosphere*, 16, 326-332. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(06\)60059-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(06)60059-3).
- Balk, J., & Pilon, M. (2011). Ancient and essential: The assembly of iron-sulfur clusters in plants. *Trends in Plant Sciences*, 16, 218-226.
- Bingru, H., & Jinmin, F. (2000). Involvement of antioxidant and lipid peroxidation in the adoption of two cool-season grasses to localized drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 45(2), 105-114.
- Blokhina, O., Virolainen, E., & Fagested, K. (2002). Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress. *Annual of Botany*, 91, 179-194.
- Bojovic, D. D., Dukic, M., Maksimovic, V., & Shocic, L. (2012). The effects of iron deficiency on lead accumulation in *Ailanthus altissima* (Mill.) swingle seedlings. *Journal of Environmental Quality*, 41 (5), 1517-1524.

- Brown, P. H., Cakmak, I., & Zhang, Q. (1993). Form and function of zinc in plants. In: Zinc in Soils and Plants. (ed. Robson, A. D.) Pp. 90-106. Kluwer Academic Publishers, Dordrech.
- Cakmak, I., & Kirkby, E. A. (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Plant Physiology*, 133, 692-704.
- Chereskin, B. M., & Castelfranco, P. A. (1982). Effects of iron and oxygen on chlorophyll biosynthesis: II. observations on the biosynthetic pathway in isolated etioclroplasts. *Plant Physiology*, 69, 112-116.
- Chiango, H., Figueiredo, A., Sousa, L., Sinclair, T., & Silva, J. M. (2021). Assessing drought tolerance of traditional maize genochlorophyll fluorescence parameters. *South African Journal of Botany*, 138, 311-317.
- Costa, M. L., Civello, P. M., Chaves, A. R., & Martinez, G. A. (2005). Effect of ethephon and 6- benzylaminopurine on chlorophyll degrading enzymes and a peroxidase-linked chlorophyll bleaching during postharvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.) at 20 °C. *Postharvest Biol Technol*, 35, 191-199.
- Earl, H. J., & Davis, R. (2003). Drought stress effects on maize. *Agronomy Journal*, 95, 688-696.
- Ebrahimian, E., & Bybordi, A. (2011). Exogenous silicium and zinc increase antioxidant enzyme activity and alleviate salt stress in leaves of sunflower. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9, 422-427.
- FAOSTAT. (2019). <http://www.fao.org/>
- Fathi-Amirkhiz, K., Amini, M., Modares-Sanavi, A. M., Reza-Zadeh, A., & Heshmati, S. (2011). Effect of iron application on enzymic activity, grain yield and oil content of safflower under water deficit conditions. *Journal of Crop Sciences*, 13, 452-465.
- Fernandez, V., Sotiropoulos, T., & Brown, P. H. (2013). Foliar fertilization. In: Scientific Principles and Field Practices. International Fertilizer Industry Association, Paris.
- Fu, J., & Huang, B. (2001). Involvement of antioxidant and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 105-114.
- Ge, T., Sui, F., Bai, L., Tong, C., & Sun, N. (2012). Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and wateruse efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. *Acta Physiology Plant*, 34, 1043-1053.
- George, M. J., Teixeira, E. L., Herreman, T. F., & Brown, H. E. (2013). Understanding nitrogen and water stress mechanisms on maize crops. *Agronomy Society of New Zealand*, 43, 27-32.
- Ghasemian, V., Ghalavand, A., Soroosh zadeh, A., & Pirzad, A. (2010). The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed. *Journal of Phytology*, 2, 73-79.
- Ghatavi, R. F., Jachson, B. C., Kiniry, J. R., & Arkin, G. F. (2012). Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal*, 81, 61-65.
- Giancarla, V., Modosa, E., Ciulca, S., Coradini, R., Iuliana, C., Mihaela, M., & Lazar, A. (2013). Influence of water stress on the chlorophyll content in bareley. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 17, 233-228.
- Hemantaranjan, A., & Garg, O. K. (1988). Iron and zinc fertilization with reference to the grain quality *Triticum aestivum* L. *Journal of Plant Nutrition*, 11, 1439-1450.
- Hua, Q., Liu, Y. G., Yan, Z. L., Zeng, G. M., Liu, S. B., Wang, W. J., Tan, X. F., Deng, J. Q., Tang, X., & Wang, Q. P. (2018). Allelopathic effect of the rice straw aqueous extract on the growth of *Microcystis aeruginosa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 953-959.
- Irget, M. E., Aksoy, U., Okura, B., Ongun, A. R., & Tepecik, M. (2008). Effect of calcium based fertilization on dried fig (*Ficus carica* L. cv. Sarilop) yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 118, 308-313.
- Levitt, J. (1980). Responses of Plant to Environmental Stress: Water, Radiation, Salt and Other Stresses. Academic Press, New York.
- Khayatnezhad, M., Zaeifzadeh, M., & Gholamin, R. (2011). Effect of end-season drought stress on chlorophyll fluorescence and content of antioxidant enzyme superoxide dismutase enzyme (SOD) in susceptible and tolerant genotypes of durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 6397-6406.
- Liu, P. (2001). The research development of molybdenum and boron nutrition in soybean. *China Agricultural Science Bulletin*, 17, 41-44.
- Loggini, B., Scartazza, A., Brugnoli, E., & Navari-Izzo, F. (1999). Antioxidative defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiology*, 119, 1091-1100.
- Marschner, H. (1986). Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, New York.
- Mates, J. M., Perez-Gomez, C., & Nunez de Castro, I. (1999). Antioxidant enzymes and human diseases. *Chemical Biochemistry*, 32(8), 595-603. doi: 10.1016/s0009-9120(99)00075-2.
- Mitra S., Mobarak, S. H., Karmakar, A., & Barik, A. (2019). Activities of antioxidant enzymes in three species of Ludwigia weeds on feeding by *Altica cyanea*. *Journal of King Saud University Science*, 31(4), 1522-1527.
- Mohsenzadeh, S., Malboobi, M. A., Razavi, K., & Farrahi-Aschtiani, S. (2006). Physiological and molecular responses of *Aeluropus lagopoides* (Poaceae) to water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 56, 314-322.
- Mojtabaie Zamani, M., Nabipour, M., & Meskarbashee, M. (2015). Effect of heat stress during grain filling on photosynthesis and grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences*,

- 17, 1-17. [In Persian].
- Noort van, D., & Wallace, A. (1963). Inhibition of chlorophyll synthesis by 5-fluorouracil and 5-fluorodeoxyuridine. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 10, 109-111.
- Ohkawa, H., Ohishi, N., & Yagi, K. (1979). Assay for lipid peroxidases in animal tissues by thiobarbituric acid reaction. *Analytical Biochemistry*, 95(2), 351-358.
- Orabi, S. A., Salman, S. R., & Shalaby, M. A. (2010). Increasing resistance to oxidative damage in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants by exogenous application of salicylic acid and paclobutrazol. *Journal of Agricultural Sciences*, 6(3), 252-259.
- Pagter, M., Bragato, C., & Brix, H. (2005). Tolerance and physiological responses of phragmites australis to water deficit. *Aquatic Botany*, 81, 285-299.
- Porra, R. J., Thompson, W. A., & Kriedemann, P. E. (1989). Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: Verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta*, 975, 384-94.
- Rabie, M. H., Eleiwa, M. E., Aboseoud, M. A., & Khalil, K. M. (1992). Effect of nickel on the content of carbohydrate and some mineral in corn and broad bean plant. *Journal of King Saud University Science*, 4, 37
- Rion, B., & Alloway, J. (2004). Fundamental aspects of zinc in soils and plants. *International Zinc Association*, 1-128.
- Said-Al, A. H., & Mahmoud, A. (2010). Effect of zinc and/or iron foliar application on growth and essential oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress. *Ozean Journal of Applied Science*, 3, 97-111.
- Shafi, M., Zhang, G., Bakht, J., Khan, M. A., Islam, U. E., Khan, M. D., & Raziuddin, G. Z. (2010). Effect of cadmium and salinity stresses on root morphology of wheat. *Pakistan Journal of Botany*, 42(4), 2747-2754.
- Shahid, H., & Maqsood, M. A. (2010). Increasing grain zinc and yield of wheat for the developing world: A review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 22, 326-339.
- Sharifa, S., & Muriefah, A. (2015). Effects of paclobutrazol on growth and physiological attributes of Soybean (*Glycine max*) plants grown under water stress conditions. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 2, 81-93.
- Siddique, Z., Jan, S., Imadi, S. R., & Ahmad, P. (2016). Drought stress and photosynthesis in plants. *Journal of Water Stress and Crop Plants*, 32, 1-11.
- Sirousmehr, A., Arabi, J., & Asgharipour, M. R. (2014). Effect of drought stress levels and organic manures on yield, essential oil content and some morphological characteristics of sweet basil. *Advance in Environmental Biology Journal*, 2, 880-885.
- Sunhar, R. (2010). Plant stress tolerance. Methods and Protocols. 2nd Ed. Springer.
- Thameur, A., Ferchichi, A., & Lopez-Carbonell, M. (2011). Quantification of free and conjugated abscisic acid in five genotypes of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water stress conditions. *South African Journal of Botany*, 77(1), 222-228.
- Thirumalaikumar, V. P., Devkar, V., Mehterov, N., Ali, S., Ozgur, R., Turkan, I., & Balazadeh, S. (2018). NAC transcription factor JUNGBRUNNEN 1 enhances drought tolerance in tomato. *Plant Biotechnology Journal*, 16, 354-366.
- Vassilev, A., & Yordanov, I. (1997). Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium-treated plants –review. *Plant Physiology*, 23, 114-133.
- Vitosh, M. L., Warncke, D. D., & Lucase, R. E. (1994). Zinc determine of crop and soil sciences. Michigan State University Extension.
- Warren, J. M., Norby, R. J., & Wullschleger, S. D. (2011). Elevated CO₂ enhances leaf senescence during extreme drought in a temperate forest. *Tree Physiology*, 31, 117-130. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr002>.
- Waraich, E. A., Ahmad, R., Halim, A., & Aziz, T. (2012). Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12, 221-244. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012000200003>.
- Wissuwa, M., Abdelbagi, M. I., & Yanagihara, S. (2006). Effects of zinc deficiency on rice growth and genetic factors contributing to tolerance. *Plant Physiology*, 142(2), 731-741.
- Wilkinson, S., & Davies, W. J. (2010). Drought, ozone, ABA and ethylene: New insights from cell to plant to community. *Plant Cell Environment*, 33(4), 510-525. doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.02052. x.
- Wu, Q. S., & Xia, R. X. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology*, 163(4), 417-25. DOI: 10.1016/j.jplph.2005.04.024.
- Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Nie, Z., & Sun, X. (2014). Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress. *Plant Physiological and Biochemical*, 83, 365-374. DOI: 10.1016/j.plaphy.2014.08.022.
- Yooyongwech, S., Phaukinsang, N., Cha-Um, S., & Supaibulwatana, K. (2013). Arbuscular mycorrhiza improved

- growth performance in *Macadamia tetraphylla* L. grown under water deficit stress in volves soluble sugar and prolin eaccumulation. *Plant Growth Regulation*, 69, 285-293. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9771-6>.
- Zafari, M., Ebadi, A., & Jahanbakhsh Godehkahriz, S. (2017). Effect of seed inoculation on alfalfa tolerance to water deficit stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*, 45(1), 82-88.
- Zhang, Z. L. (1990). Guide to plant physiology experiments. Beijing: Higher Education Press.
- Zhou, R., Squires, T. M., Ambrose, S. J., Abrams, S. R., Ross, A. R., & Cutler, A. J. (2003). Rapid extraction of abscisic acid and its metabolites for liquid chromatography Tandem mass spectrometry. *Journal of chromatography*, 1010(1), 75-85.

The effect of foliar application of micro-elements on some biochemical traits and wheat yield under water stress conditions

Shahin Shahgholi¹, Saeed Sayfzadeh^{1*}, Esmail Hadidi Masouleh¹, Naser Shahsavari² and Hamidreza Zakerin¹

¹ Department of Agronomy, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

² Department of Plant Production, Hajiabad branch, Islamic Azad University, Hajiabad, Iran

(Received: 19/08/2022, Accepted: 10/01/2023)

Abstract

In order to investigate the effect of foliar application of micro-elements on some biochemical traits and wheat yield under water stress conditions, an experiment was carried out in the form of split plots based on a randomized complete block design in three replications in Varamin during the two crop years 2016–2017 and 2017–2018. The main factors of irrigation regimes at three levels (I1: normal irrigation, I2: cut-off irrigation at the beginning of stem growth, and I3: cut-off irrigation at the beginning of stem growth and seed filling) and sub-factors including foliar spraying of micro-elements at eight levels (M1: control (without foliar spraying), M2: boron foliar application, M3: zinc, M4: iron, M5: zinc+boron, M6: iron+boron, M7: zinc+iron and M8: zinc+boron+iron) were considered. The irrigation was done twice in the autumn and four times in the spring under normal irrigation conditions. The foliar spraying of each of the micronutrients from the sources of iron sulfate, boron sulfate and zinc sulfate with a concentration of 5/1000 was carried out in two stages: stemming and spike emergence. The results showed the effect of irrigation regimes, foliar application of micro-elements and their interaction on the content of chlorophyll a, b and total chlorophyll, the concentration of chlorophyllase enzyme, malondialdehyde and abscisic acid. Also, the simple effect of irrigation and foliar spraying was significant on total sugar concentration and grain yield. The results showed that the interruption of irrigation led to a decrease in total chlorophyll. Foliar spraying of zinc + boron + iron (M8) in all three levels of irrigation regimes led to a significant increase in total chlorophyll. The highest amount of total chlorophyll was obtained under normal irrigation conditions, along with zinc+boron+iron (I1M8) foliar spraying at a rate of 6.03 mg.g⁻¹ of fresh leaves. Also, foliar spraying of zinc+boron+iron in irrigation treatments (I2) and (I3) (respectively, with averages of 5.2 and 4.55 mg.g⁻¹ of fresh leaves) led to an increase in total chlorophyll compared to control. In general, the use of foliar applications of iron, zinc, and boron can improve the physiological characteristics of wheat under stressful conditions while increasing grain yield.

Keywords: Abscisic acid, Zinc sulfate, Chlorophyllase, Wheat, MDA

Corresponding author, Email: saeedsayfzadeh@yahoo.com