Applied Biology
Online ISSN: 2538-3434
Homepage: http://sjoapb.journal.qom-iau.ac.ir

Research article

The effect of foliar feeding of iron, zinc and manganese nanochelates on chlorophyll fluorescence, iron, zinc and manganese concentration in seeds and soybean yield[1]

Mohammad Saeed Vaghar | Assistant Professor, Department of Agriculture, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. ms.vaghar@yahoo.com

Abstract

Objective: Dehydration stress disrupts the balance of absorption and transfer of micronutrients from roots to aerial organs and is a serious threat to agricultural products. This experiment was conducted to investigate the effect of iron, zinc and manganese nano chelate spraying on chlorophyll index, chlorophyll fluorescence, concentration of iron, zinc and manganese elements in seeds and their relationship with soybean yield.

Materials and methods: The experiment was carried out in the form of a split plot, in the form of a completely randomized block design with three repetitions in two consecutive years. The main factor of the irrigation regime in the main plot includes stopping irrigation at the stage of flowering, podding, seed filling and full irrigation and the secondary factor of spraying with distilled water (control), iron, zinc, manganese, iron + zinc, iron + manganese, zinc + manganese. And iron + zinc + manganese were in sub-plots.

Findings: Drought stress significantly reduced grain yield, which was the largest reduction in podding stage (31.4% reduction compared to the control). The lowest and highest amount of chlorophyll fluorescence was obtained due to stress in the stage of podding and full irrigation. Iron and iron + zinc treatments had the highest chlorophyll fluorescence and chlorophyll index, respectively. The control treatment had the highest and the stress treatment had the lowest concentration of iron, zinc and manganese in the seed during the podding stage.

1. **Received:** 2022/04/02 ; **Received in revised form:** 2022/05/05 ; **Accepted:** 2022/06/07 ; **Published online:** 2022/06/22

Cite this article: Vaghar, m.s. (2022). The effect of foliar feeding of iron, zinc and manganese nanochelates on chlorophyll fluorescence, iron, zinc and manganese concentration in seeds and soybean yield. *Applied Biology*, 12(46), 105-126.

© the authors

Publisher: Qom Islamic Azad University

Conclusion: Fertilization of iron, zinc and manganese nanochelates in water deficit conditions is a practical method to reduce chlorophyll fluorescence, increase the content of micronutrients in seeds and seed yield. The combined treatment of iron + zinc was the best treatment.

Keywords: Drought stress, Foliar nutrition, Soybean, Chlorophyll index, Chlorophyll fluorescence, Mano chelate, Iron, zinc, Manganese.

بیولوژی کاربردی
شاپا الکترونیکی: ۲۵۳۸-۳۴۳۴
Homepage: http://sjoapb.journal.qom-iau.ac.ir

مقاله پژوهشی

اثر تغذیه برگی نانوکلات آهن، روی و منگنز بر فلورسانس کلروفیل، غلظت آهن، روی و منگنز دانه و عملکرد دانه سویا[1]

محمد سعید وقار | استادیار، گروه زراعت، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. ms.vaghar@yahoo.com

چکیده

هدف: تنش کم آبی تعادل جذب و انتقال ریزمغذی‌ها از ریشه به اندام‌های هوایی را مختل می‌کند و تهدید جدی برای محصولات کشاورزی است. این آزمایش به منظور بررسی اثر محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز بر شاخص کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، غلظت عناصر آهن، روی و منگنز دانه و ارتباط آن‌ها با عملکرد دانه سویا انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت اسپلیت پلات، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال متوالی اجرا شد. عامل اصلی رژیم آبیاری در کرت اصلی شامل قطع آبیاری در مرحله گلدهی، غلاف‌دهی، پر شدن دانه و آبیاری کامل و عامل فرعی محلول‌پاشی با آب مقطر (شاهد)، آهن، روی، منگنز، آهن+روی، آهن+منگنز، روی+منگنز و آهن+روی+منگنز در کرت‌های فرعی بود.

یافته‌ها: تنش خشکی عملکرد دانه را به طور معنی‌داری کاهش داد که بیشترین کاهش در مرحله غلاف‌دهی (۳۱/۴ درصد کاهش نسبت به شاهد) بود. کمترین و بیشترین میزان فلورسانس کلروفیل در اثر تنش در مرحله غلاف‌دهی و آبیاری کامل به دست آمد. تیمارهای آهن و آهن+روی به ترتیب بالاترین فلورسانس کلروفیل و شاخص کلروفیل را داشتند. تیمار شاهد بالاترین و تیمار تنش در مرحله غلاف‌دهی کمترین غلظت آهن، روی و منگنز دانه را دارا بودند.

---

۱. **تاریخ دریافت:** ۱۴۰۱/۰۱/۱۲؛ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۱/۰۲/۱۵؛ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۳/۱۷؛ **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

پژوهش حاضر مستخرج از: رساله دکتری رشته کشاورزی، زراعت (فیزیولوژی گیاهی)، محمد سعید وقار، با عنوان: **تأثیر محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز بر تعدیل اثرات تنش خشکی و عملکرد سویا**، ارائه شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان در سال ۱۳۹۹ است.

استناد: وقار، محمدسعید (۱۴۰۱). اثر تغذیه برگی نانوکلات آهن، روی و منگنز بر فلورسانس کلروفیل، غلظت آهن، روی و منگنز دانه و عملکرد دانه سویا. *بیولوژی کاربردی*، ۱۲(۴۶)، ۱۰۵-۱۲۶.

© نویسندگان **ناشر:** دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم

نتیجه‌گیری: محلول‌پاشی نانوکلات‌های آهن، روی و منگنز در شرایط کم آبی یک روش کاربردی در جهت کاهش فلورسانس کلروفیل، افزایش محتوای ریزمغذی‌ها در دانه و عملکرد دانه است. تیمار ترکیبی آهن+روی بهترین تیمار بود.

کلیدواژه‌ها: تنش خشکی، تغذیه برگی، سویا، عناصر ریزمغذی، فلورسانس کلروفیل، نانو کلات آهن، روی، منگنز.

۱. مقدمه

سویا یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در جهان است. دانه سویا با ٤٥-۳۵ درصد پروتئین، ۲۳-۱۸ درصد روغن و ٤-۳ درصد مواد معدنی، می‌تواند تا حد زیادی نیاز غذایی انسان را تأمین کند (۱). نقش مهم سویا در اقتصاد، مصارف صنعتی است و در سیستم‌های کشت از نظر توانایی در تثبیت نیتروژن، اتمسفری جایگاه ویژه‌ای دارد (۲).

تنش آبی یکی از شایع‌ترین تنش‌های زیستی است که با ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی، تولید محصولات کشاورزی را محدود می‌کند. کاهش رطوبت برگ و بسته شدن روزنه‌ها، اولین عکس‌العمل گیاه به تنش خشکی است که منجر به کاهش ورود CO_2 به سلول‌های مزوفیلی، کاهش فتوسنتز خالص و کاهش تولید محصول می‌شود (۳). از دیگر عوامل تأثیرگذار تنش کم آبی، کاهش کارایی فتوسنتز از طریق افزایش فلورسانس کلروفیل است (۴). غلظت کلروفیل برگ یکی از معیارهای مهم تنش‌های محیطی است، که میزان کلروفیل و فتوسنتز گیاه در اثر تنش کاهش می‌یابد، کاهش فتوسنتز خالص می‌تواند به دلیل تخریب کلروفیل و اختلال در فتوسنتز با محدودیت شدید رطوبتی باشد (۵). یکی از راه‌های مطالعه و شناسایی اختلالات در فتوسنتز، بررسی فلورسانس کلروفیل و خصوصیات مرتبط با آن است (۶).

فلورسانس کلروفیل به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری تأثیر تنش‌های محیطی مانند تنش آبی بر گیاهان زراعی و تعیین مقاومت به خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۷)، که نشان‌دهنده سلامت غشای تیلاکوئید و بازده نسبی انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I می‌باشد (۸). فتوسیستم II در وضعیت کاملاً اکسیده شده هستند، این سیستم کمترین میزان فلورسانس (Fo) را دارد که به تدریج با افزایش احیاء شدن این مولکول‌ها، فلورسانس افزایش می‌یابد. این روند تا احیای کامل مولکول‌های آن ادامه دارد. در این صورت مرکز فتوسیستم در حالت احیای کامل بوده و دارای بالاترین فلورسانس (Fm) است. در حقیقت تنش خشکی با تأثیر منفی بر همانندسازی کربن، ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون را کاهش می‌دهد، در نتیجه سیستم به سرعت به بالاترین فلورسانس می‌رسد، که منجر به کاهش فلورسانس متغیر (Fv) می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش شدت نور، سیستم فتوسنتز با یك روش تنظیمی برای کاهش انرژی القاء شده تحریکی، انرژی اضافی را با افزایش خاموشی غیر فتوشیمیایی به صورت فرآیند غیر تشعشعی از دست می‌دهد. با این مکانیسم تنظیمی، ضمن محافظت از مرکز واکنش، آسیب به این مرکز را به حداقل می‌رساند

(۹، ۱۰). از این‌رو کارآیی فتوشیمیایی فتوسیستم II به صورت (Fv/Fm) نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس ماکزیمم بیان می‌شود. بنابراین، تنش‌های محیطی با تأثیر بر فتوسیستم II این نسبت را کاهش می‌دهد (۱۱). یکی از دلایل حساسیت فتوسیستم II به تنش‌های محیطی، وجود کمپلکس تجزیه‌کننده آب در این فتوسیستم است. پژوهشگران گزارش داده‌اند که اختلال در انتقال الکترون در چرخه کینون مرتبط با فتوسنتز II می‌باشد، که عملکرد کوانتومی را کاهش می‌دهد (۱۲). همچنین پروتئین‌های فتوسنتز II (D_1 و D_2) که از اجزای اصلی فتوسیستم هستند، در اثر تنش تجزیه، و منجر به بازدارندگی نوری می‌شود (۱۳، ۱۴). به طور کلی فلورسانس کلروفیل یک شاخص فیزیولوژیکی معتبر برای تعیین تغییرات القاء شده در دستگاه فتوسنتزی بدون تخریب بافت گیاهی است (۱۵، ۱۶).

عناصر کم مصرف در واکنش‌های بیوشیمیایی درون سلول، متابولیسم مواد غذایی، فتوسنتز و تنفس، نقش ویژه‌ای دارند. بنابراین، افزایش غلظت این عناصر در گیاه، غلظت کلروفیل برگ را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد (۱۷، ۱۸). عنصر آهن از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده همه پروتئین‌ها و پروتئین‌های Fe-s (دو دسته از بزرگ‌ترین پروتئین‌ها) است که به دلیل وجود کمپلکس آهن و حلقه پروفیرین، به‌عنوان سیتوکروم عمل می‌کنند (۱۹). آهن برای سنتز هر دو گروه پروتئین‌ها ضروری است. وجود آهن برای پروتوپورفیرین که به عنوان پیش ماده کلروفیل شناخته می‌شود، کاملاً ضروری است. همچنین جهت تبدیل منیزیم پروتوپورفیرین به پروتوکلروفیلاید، به وجود آهن نیاز است (۲۰). کمبود روی سبب کاهش فعالیت کربن آنهیدراز، کاهش فعالیت فتوفسفوریلاسیون غیرچرخه‌ای، فتوسیستم نوری II و واکنش هیل می‌شود (۲۱). واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء در فرآیند فتوسنتز و در زنجیره انتقال الکترون به وجود منگنز بستگی دارد (۲۲). منگنز نیز نقش مؤثری در تجزیه آب (واکنش هیل) دارد (۲۳، ۲۴). در سنتز اسیدهای آمینه و کربوهیدرات‌ها و همچنین در احیای نیترات و سولفات ضروری است (۲۵).

نانو کودها حاوی عناصر غذایی در ابعاد ۳۰ تا ۴۰ نانومتر (10^{-9} متر) می‌باشند که به دلیل سطح ویژه زیاد، قادر به حمل مناسب یون‌ها هستند (۲۶، ۲۷). این فناوری منجر به آزادسازی بهتر و افزایش کارآیی جذب عناصر غذایی در کود می‌شود (۲۸). این نانو ذرات علاوه بر حلالیت بیشتر، قابلیت نفوذ در غشای سلولی را نیز دارند (۲۹). در شرایطی که pH خاک قلیایی باشد، جذب مواد غذایی از طریق ریشه مختل می‌شود، لذا، کاربرد عناصر ریزمغذی به روش تغذیه برگی

مؤثرتر است (۳۰). موحدی دهنوی[1] و همکاران (۲۰۰۹) گزارش دادند که محلول‌پاشی روی و منگنز، میزان کلروفیل را افزایش می‌دهد. دلیل آن می‌تواند به دلیل نقش این عناصر در متابولیسم نیتروژن و ساخت کلروفیل باشد. با توجه به حساسیت سویا در مراحل زایشی به تنش خشکی، بررسی تأثیر شرایط مختلف رطوبت بر فتوسنتز، پارامترهای فلورسانس کلروفیل و شاخص کلروفیل برگ ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، مطالعه حاضر بررسی کاربرد ریزمغذی‌های آهن، روی و منگنز بر افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی و کاهش فلورسانس کلروفیل رقم M9 سویا در شرایط تنش کم آبی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. خصوصیات جغرافیایی مکان آزمایش

آزمایش پژوهش حاضر در دو سال زراعی ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ در مجتمع تحقیقاتی کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۳۵۱ متر از سطح دریا اجرا شد. متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارندگی سالیانه ۴۷۹/۷ میلی‌متر و متوسط رطوبت سالیانه ۲۴/۴ درصد بود. این محل دارای آب و هوای خشک سرد تا معتدل است.

۲-۲. مشخصات طرح و فاکتورهای آزمایشی

آزمایش به صورت طرح اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار شامل ۳۲ تیمار و ۹۶ کرت آزمایشی اجرا شد. هر کرت شامل ۶ خط کاشت به طول ۴ متر بود. فاصله خطوط نیز ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. رقم مورد استفاده M9 از گروه رسیدگی ۲ که جزو ارقام زودرس با رشد نامحدود، پر محصول و مقاوم به ریزش است، بود. فاکتور اصلی آبیاری در چهار سطح آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل شروع گلدهی، شروع غلاف‌دهی، شروع پر شدن دانه و فاکتور فرعی محلول‌پاشی کود نانو در هشت سطح: آب مقطر (شاهد)، آهن، روی، منگنز، آهن + روی، آهن + منگنز، منگنز + روی، آهن + روی + منگنز اجرا شد. به‌منظور محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی از کود شیمیایی با نام تجاری نانو کلات آهن (۹ درصد)، روی (۱۲ درصد) و منگنز (۱۲

1. Movahhedy-Dehnavy

درصد) به‌صورت پودر و کاملاً محلول در آب استفاده شد که از شرکت احرار شرق خضراء تهیه شد. این محلول دارای pH حدود ۶/۵ بود.

۲-۳. عملیات زراعی

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از آزمایش، از چند نقطه از مزرعه نمونه‌برداری شد. نتایج تجزیه خاک نشان داد که بافت خاک از نوع سیلت کلی است (جدول ۱). براساس آزمایش خاک، ۴۷ کیلوگرم اوره و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات به زمین اضافه شد. بذر سویا قبل از کشت با محلول ۱۰ درصد آب و شکر (۳۲)، با باکتری همزیست با سویا[1] به میزان ۲۵ گرم به ازای ۷ کیلوگرم بذر مخلوط شد (۳۳). کاشت به صورت دستی در ۱۰ اردیبهشت ماه در عمق ۵ سانتی‌متری وسط پشته‌ها انجام شد. فاصله بین بذرها ۵ سانتی‌متر بود. برای اطمینان از درصد مطلوب جوانه‌زنی و سبز شدن و رسیدن به تراکم مناسب، در هر مکان دو بذر کاشته شد و در زمان تشکیل دومین برگ سه برگچه‌ای (V_2)، بوته‌ها تنک شدند. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و دور آبیاری در طول فصل زراعی متغیر بود (۵ تا ۸ روز). به منظور برآورد میزان آب مصرفی و کنترل مقدار آب در هر بار آبیاری، مزرعه به سیستم آبیاری لوله پلی اتیلن و کنتور آب مجهز شد. محلول‌پاشی نانو کلات با استفاده از سم‌پاش پشتی در شب به عنوان خنک‌ترین ساعت روز، با غلظت سه در هزار، در دو مقطع زمانی (تشکیل چهارمین برگ سه برگچه‌ای (V_4) و یک هفته بعد از محلول‌پاشی نوبت اول) انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (عمق ۳۰- ۰ سانتی‌متر)

شن Sand	رس Clay	لوم Silt	مواد آلی Organic matter	ازت N		منگنز Mn	آهن Fe	روی Zn	پتاسیم K	فسفر P	اسیدیته pH
(%)						($mgkg^{-1}$)			(ppm)		
13	40	47	2.5	0.17		4.4	6.2	0.78	521	10.2	7.4

۲-٤. صفات مورد بررسی

به منظور ارزیابی محتوای کلروفیل برگ (SPAD value) با استفاده از دستگاه کلروفیل متر (Konica Minota, Chlorophyll Metter SPAD-502, Japan) دو هفته پس از گلدهی، اقدام به

1. Brady Rhizobium japonicum

اندازه‌گیری شد. از هر کرت آزمایشی ۵ بوته به طور تصادفی انتخاب شد. از هر بوته ۶ برگ (۳۰ برگ) از برگ‌های گره چهارم به بالا عدد کلروفیل متر قرائت و میانگین گرفته شد. سپس داده‌های کلروفیل متر در سه تکرار ثبت شد. شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (Fo، Fm، Fv و Fv/Fm) با استفاده از دستگاه تنش‌سنج اندازه‌گیری شد (Plant stress meter Biomontor AB, Effeltrich, Germany). مدت سازگاری برگ‌ها به تاریکی ۳۰ دقیقه، شدت نور دستگاه ۴۰۰ میکرو اینشتین بر متر مربع در ثانیه و مدت تابش ۲ ثانیه تنظیم گردید. همچنین میزان جذب آهن، روی و منگنز دانه توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin 400 برحسب میلی گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شد (۳۴). در انتهای فصل رشد و در مرحله رسیدگی کامل، بوته‌های دو ردیف وسط هر کرت آزمایشی (ردیف‌های ۳ و ۴)، با در نظر گرفتن ۵۰ سانتی‌متر حاشیه از ابتدا و انتهای خطوط کشت، به طور کامل برداشت شد. عملکرد دانه در رطوبت ۱۳ درصد محاسبه (۳۳)، و برحسب کیلوگرم در هکتار ثبت گردید.

۲-۵. تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS[1] تجزیه و تحلیل شدند. میانگین‌ها براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن[1] در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که تنش خشکی و کاربرد ریزمغذی‌های آهن، روی و منگنز و اثرات متقابل این عوامل بر عملکرد دانه سویا تأثیر معنی‌داری ($P < ۰/۰۱$) دارد (جدول ۲). اثر تنش خشکی در مراحل رشد گیاه متفاوت بود؛ زیرا در هر یک از مراحل گلدهی، تشکیل غلاف و پر شدن دانه قسمت‌های خاصی از اجزای عملکرد، تشکیل می‌شود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر تنش خشکی در مرحله غلاف‌دهی بیشتر بود، به طوری که عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد ۲۹/۱ درصد کاهش یافت. این تیمار تفاوت معنی‌داری با تیمار تنش در مرحله پر شدن

1. Statistical Analysis System
1. Duncan

دانه نداشت (جدول ۳). یکی از دلایل کاهش عملکرد در این مرحله می‌تواند کاهش طول دوره پر شدن دانه و پیری زودرس برگ‌ها باشد (۳۵).

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب اثر رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز بر شاخص کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، غلظت عناصر ریزمغذی دانه و عملکرد دانه سویا

منابع تغییرات S.O.V	df	عملکرد دانه Seed yield	شاخص کلروفیل SPAD value	فلورسانس کلروفیل Fv/Fm	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn
سال	1	108649.4^{ns}	13.68^{ns}	0.0021^{ns}	57.74^{ns}	20.39^{ns}	36.69^{ns}
تکرار× سال	4	324093.7	6.71	0.003	19.59	1.44	10.20
آبیاری	3	10227373.1**	242.44**	5.570**	1022.5**	394.70**	549.29**
سال×آبیاری	3	3719.7^{ns}	0.245^{ns}	0.0012^{ns}	16.80^{ns}	0.20^{ns}	2.39^{ns}
محلول‌پاشی	7	2363371.7**	92.78**	0.0309**	4539.2**	5620.8**	4686.8**
سال×محلول‌پاشی	7	7081.8^{ns}	2.961^{ns}	0.0088^{ns}	16.02^{ns}	0.32^{ns}	2.25^{ns}
آبیاری×محلول‌پاشی	21	66515.5**	2.653^{ns}	0.0022**	24.69^{ns}	1.05**	6.98**
سال× آبیاری× محلول‌پاشی	21	4200.8^{ns}	2.345^{ns}	0.0008^{ns}	17.50^{ns}	0.09^{ns}	2.98^{ns}
ضریب تغییرات (٪)	-	11.74	10.08	10.76	5.41	5.61	7.41

ns , * , ** به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر رژیم آبیاری بر شاخص کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، غلظت عناصر ریزمغذی دانه و عملکرد دانه سویا

منابع تغییرات S.O.V	عملکرد دانه Seed yield (Kg.ha^{-1})	شاخص کلروفیل SPAD value	فلورسانس کلروفیل Fv/Fm	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn
				(Mg.Kg^{-1})		
سال ۱	2582.70^{a}	27.22^{a}		72.96^{a}	47.17^{a}	54.98^{a}
سال ۲	2509.13^{a}	28.04^{a}		71.87^{a}	46.53^{a}	54.11^{a}
آبیاری کامل	3222.21^{a}	28.46^{b}	0.84^{a}	77.19^{a}	50.01^{a}	58.13^{a}
قطع آبیاری در مرحله گلدهی	2533.32^{b}	29.71^{a}	0.83^{b}	74.70^{a}	48.26^{b}	56.46^{a}
قطع آبیاری در مرحله غلاف‌دهی	2208.52^{c}	24.28^{c}	0.81^{c}	71.25^{b}	45.61^{c}	52.95^{b}
قطع آبیاری در مرحله تشکیل دانه	2283.44^{c}	28.11^{b}	0.82^{c}	66.53^{c}	43.51^{d}	50.64^{b}

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

در ارزیابی اثر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی مشخص شد که استفاده از این عناصر در شرایط

مساعد و بروز تنش خشکی، تغییرات قابل توجهی در عملکرد دانه ایجاد می‌کند. هنگامی که به صورت ترکیبی استفاده شدند، عملکرد دانه بیشتر از حالت منفرد افزایش یافت. نتایج نشان داد که تیمارهای آهن+روی و روی+منگنز از نظر عملکرد دانه، تفاوت معنی‌داری با هم ندارد، اما تیمار آهن+روی با میانگین ۲۹۳۹/۱ کیلوگرم در هکتار بیشترین و تیمار شاهد (۲۱۰۸/۲ کیلوگرم در هکتار) کم‌ترین عملکرد دانه را دارند (جدول ۳).

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز بر شاخص کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، غلظت عناصر ریزمغذی دانه و عملکرد دانه سویا

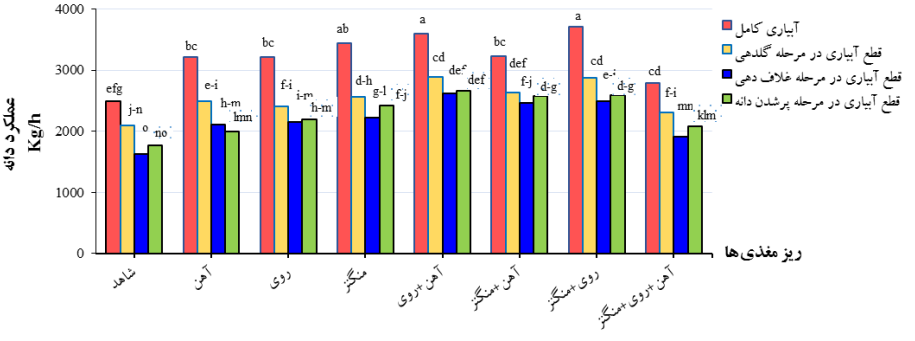
منابع تغییرات S.O.V	عملکرد دانه Seed yield ($Kg.ha^{-1}$)	شاخص کلروفیل SPAD value	فلورسانس کلروفیل Fv/Fm	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn
				($Mg.Kg^{-1}$)		
شاهد	2108.2^{f}	22.02^{e}	0.82^{c}	43.80^{g}	29.04^{f}	32.34^{e}
آهن	2491.3^{cd}	27.59^{bc}	0.85^{a}	86.05^{a}	34.30^{e}	46.25^{d}
روی	2517.7^{bc}	29.67^{b}	0.84^{ab}	64.80^{f}	62.05^{b}	48.12^{d}
منگنز	2476.5^{d}	26.59^{c}	0.83^{b}	72.23^{d}	35.45^{e}	72.96^{a}
آهن + روی	2939.1^{a}	30.58^{a}	0.84^{ab}	84.21^{ab}	63.03^{b}	47.79^{e}
آهن + منگنز	2730.6^{b}	29.71^{b}	0.83^{b}	82.08^{b}	37.53^{d}	65.81^{b}
روی + منگنز	2906.9^{a}	30.33^{a}	0.84^{ab}	69.35^{e}	68.11^{a}	70.32^{a}
آهن + روی + منگنز	2274.7^{e}	24.69^{d}	0.83^{b}	76.82^{c}	45.29^{c}	52.76^{c}

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

راوی[1] و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که عملکرد دانه آفتابگردان با محلول‌پاشی آهن و روی در شرایط تنش خشکی بهبود می‌یابد. این افزایش به دلیل سطح ویژه نانو کلات‌ها و قابلیت جذب و تحرک بیشتر در گیاه است. با توجه به نقش عناصر آهن و روی در فتوسنتز، می‌توان گفت که عناصر کم‌مصرف با افزایش میزان فتوسنتز و طول دوره گلدهی و غلاف‌دهی، موجب افزایش سطح برگ، افزایش تعداد دانه در غلاف و وزن خشک گیاه می‌شود که در نهایت منجر به افزایش عملکرد دانه می‌گردد (۳۷، ۳۹). نتایج مشابهی در دیگر گیاهان زراعی مانند شنبلیله در اثر محلول‌پاشی آهن (۴۰)، و تخم کاغذی با تغذیه برگی روی و منگنز (۴۱) گزارش شده است.

1. Ravi

اثر برهمکنش رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات‌ها نشان داد که بیشترین عملکرد دانه با ۴۸/۷ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد، از ترکیب تیمار آبیاری در تمام مراحل رشد و محلول‌پاشی روی + منگنز به دست آمد (۳۷۰۴/۶ کیلوگرم در هکتار)، که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای آهن + روی و منگنز ندارد. تیمار شاهد با میانگین ۱۶۲۲/۱ کیلوگرم در هکتار، در شرایط تنش در مرحله غلاف‌دهی، از عملکرد دانه کمتری برخوردار بود. در حالی که تیمار ترکیبی آهن و روی در شرایط تنش در مرحله گلدهی، غلاف‌دهی و پر شدن دانه، عملکرد دانه بالاتری داشت (نمودار ۱).



نمودار ۱- اثر برهمکنش رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات‌ها بر عملکرد دانه سویا (میانگین دو سال)
ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

۳-۲. فلورسانس کلروفیل و شاخص کلروفیل برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش خشکی و محلول‌پاشی نانوکلات آهن، روی و منگنز تأثیر معنی‌داری ($P < ۰/۰۱$) بر شاخص کلروفیل و فلورسانس کلروفیل برگ سویا دارد. همچنین برهمکنش این تیمارها بر فلورسانس کلروفیل برگ، معنی‌دار بود (جدول ۲).

کمترین فلورسانس کلروفیل از تیمار تنش خشکی در مرحله غلاف‌دهی و بیشترین در شرایط بدون تنش حاصل شد. در حالی که بروز تنش در مرحله گلدهی باعث افزایش شاخص کلروفیل برگ شد، که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. کمترین میزان به تیمار تنش در مرحله غلاف‌دهی تعلق داشت (جدول ۳). به نظر می‌رسد افزایش مقدار کلروفیل در اثر تنش خفیف در مرحله گلدهی با افزایش وزن مخصوص برگ مرتبط است. تنش خشکی با کاهش اندازه سلول، باعث کاهش سطح برگ می‌شود. بنابراین، در زمان تنش خفیف، به دلیل وجود سلول‌های بزرگ‌تر در واحد وزن برگ،

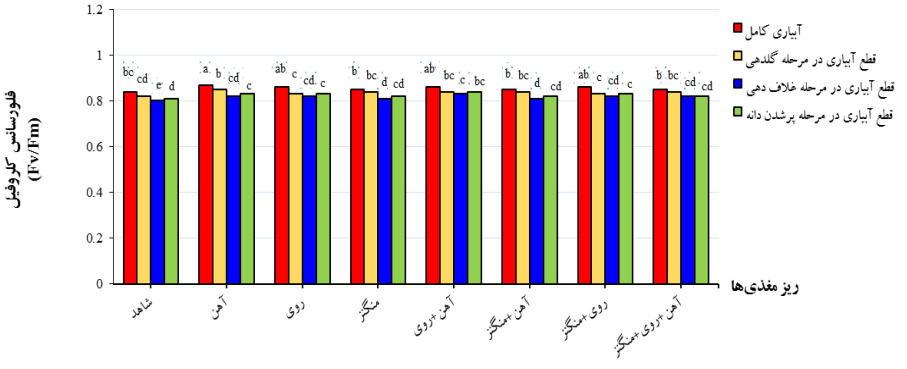
میزان کلروفیل افزایش می‌یابد (۴۲). ژائو[1] و همکارن (۲۰۰۷) کاهش شاخص کلروفیل برگ یولاف را در اثر تنش خشکی به ممانعت تنش ناشی از سنتز و یا افزایش تجزیه کلروفیل برگ مرتبط می‌دانستند. در حالی که انجم[2] و همکاران (۲۰۰۳) گزارش دادند که تنش خشکی مقدار کل کلروفیل در جو را افزایش می‌دهد. این پژوهشگران معتقد بودند که تنش خشکی منجر به کاهش مقدار کلروفیل b می‌شود، اما افزایش پایداری کلروفیل را درپی دارد که باعث افزایش مقدار کل کلروفیل می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان چنین استنباط نمود که کاهش Fv/Fm عمدتاً به دلیل بروز اختلال کلروپلاست بوده است؛ زیرا فلورسانس کلروفیل به طور مستقیم به فعالیت کلروفیل در واکنش فتوسیستم‌ها ارتباط دارد و می‌تواند به عنوان یک معیار برای ارزیابی کارآیی فتوسیستم قرار گیرد. با افزایش مقدار تنش، نسبت Fv/Fm کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش میزان حفاظت نوری و کارآیی فتوسنتز است. مقدار Fv/Fm نشان‌دهنده ظرفیت انتقال الکترون از فتوسیستم II است (۴۵). گیاهان در پاسخ به تنش آبی و به منظور حفظ آب برگ، با بستن روزنه‌ها تعرق را کاهش می‌دهند، از سوی دیگر، به انتقال غیرفعال آوند چوب آسیب وارد می‌کند. همچنین کمبود آب منجر به اختلال در واکنش‌های نوری فتوسنتز و تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که در نهایت منجر به تخریب فتوسیستم‌های نوری و کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (۴۶). کاهش میزان و فعالیت آنزیم روبیسکو، مهار سنتز ریبولوز بی فسفات و کاهش انتقال الکترون فتوسنتزی به فتوسیستم II وابسته است (۴۷).

در بین تیمارهای محلول‌پاشی، بیشترین شاخص کلروفیل برگ مربوط به تیمارهای آهن + روی و روی + منگنز بود که تفاوت معنی‌داری با دیگر تیمارها داشت. کمترین میزان مربوط به تیمار شاهد بود. این در حالی است که بیشترین میزان فلورسانس کلروفیل (Fv/Fm) در تیمار آهن به دست آمد (جدول ۴). روی به عنوان یك کوفاکتور در فعال شدن چندین آنزیم دخالت می‌کند. این آنزیم‌ها در متابولیسم کربوهیدرات و پروتئین نقش دارند. منگنز نیز یکی از اجزای ساختمانی کلروفیل است و کمبود آن باعث کاهش میزان سنتز کلروفیل می‌شود (۴۸). از نتایج به دست آمده چنین استنباط می‌شود که دلیل کم بودن میزان کلروفیل و فلورسانس کلروفیل در تیمار روی ممکن

1. Zhao
2. Anjum

است مربوط به این باشد که این عنصر نقش مهمی در سنتز کلروفیل ندارد.



نمودار ۲- اثر برهم‌کنش رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات‌ها بر فلوسانس کلروفیل سویا (میانگین دو سال)
ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد
فاقد تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

همان‌طور که در نمودار (۲) ملاحظه می‌شود، فلورسانس کلروفیل با کاهش آب مصرفی کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش مربوط به تیمار شاهد (عدم آبیاری) در مرحله غلاف‌دهی بود و پس از آن تیمار شاهد در شرایط تنش در مرحله پرشدن دانه از فلورسانس کلروفیل پایین‌تری برخوردار بود. با استفاده از تیمار آهن+روی تحمل گیاه به خشکی افزایش یافت و بیشترین میزان فلوسانس کلروفیل به دست آمد. در حالی که در شرایط تنش در مرحله گلدهی تیمار آهن مؤثرتر واقع شد.

۳-۳. عناصر ریز مغذی آهن، روی و منگنز

طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس، اثر ساده رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز بر محتوای آهن، روی و منگنز دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنان که برهم‌کنش تیمارهای آزمایشی بر تجمع عناصر روی و منگنز دانه معنی‌دار بود (جدول ۲).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی به میزان قابل توجهی غلظت آهن، روی و منگنز دانه را کاهش می‌دهد. با افزایش شدت تنش، محتوای این عناصر کاهش بیشتری داشت (جدول ۳). بدیهی است که کاهش غلظت عناصر ریزمغذی در اندام‌های هوایی در تیمارهای تنش‌زا به علت کمبود رطوبت و اختلال در جذب و انتقال مواد غذایی است. بیشترین میزان آهن، روی و منگنز در دانه از تیمار شاهد و کمترین آن در اثر تنش خشکی، در مرحله پر شدن دانه به دست آمد که به ترتیب ۱۳/۸، ۱۳ و ۱۲/۹ درصد نسبت به شاهد کاهش داشت (جدول ۳). این مطالب مطابق با دیدگاه

سوری و بختیاریزاد[1] (۲۰۱۹) است که معتقد بودند، تنش خشکی تولید مواد فتوسنتزی را کاهش می‌دهد و در انتقال مواد فتوسنتزی به قسمت‌های مختلف گیاه اختلال ایجاد می‌کند. مکانیسم جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان، مانند جریان توده‌ای، انتشار و پدیده اسمزی، همگی کم و بیش به میزان رطوبت خاک و ریشه وابسته است و در صورت کمبود رطوبت، شدت و میزان جذب عناصر غذایی دستخوش تغییر می‌گردد. براساس گزارش وقار[2] و همکاران (۲۰۲۰) تنش خشکی در مرحله زایشی انتقال عناصر روی و منگنز به دانه را محدود می‌سازد. در آزمایش دیگری مشخص شد که با اعمال تنش خشکی در مرحله گلدهی و پر شدن دانه، میزان این عناصر در مقایسه با تیمار شاهد کاهش می‌یابد (۵۱). دما و تهویه محیط ریشه از جمله عواملی هستند که به شدت بر میزان جذب روی تأثیر می‌گذارند (۵۲).

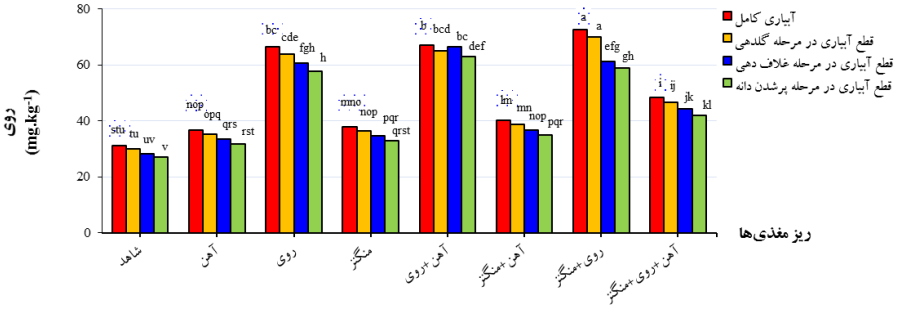
با کاربرد منفرد و ترکیبی عناصر کم مصرف محتوای آهن، روی و منگنز دانه افزایش یافت (جدول ۳). این موضوع می‌تواند به ارتباط بین آوند چوب و آبکش در گل آذین گیاه، تبادل مناسب عناصر بین آن‌ها و انتقال به دانه‌های در حال رسیدگی مربوط باشد (۵۳). حداکثر غلظت آهن در دانه با محلول‌پاشی آهن به دست آمد (جدول ۳). به نظر می‌رسد دسترسی بهتر و سریع‌تر آهن در روش محلول‌پاشی از تخریب کلروفیل و زرد شدن برگ‌ها جلوگیری می‌کند و با توجه به نقش مؤثر آهن در سیستم انتقال الکترون، فتوسنتز جاری گیاه بهبود می‌یابد.

قابل توجه است که از نظر غلظت آهن در دانه، تفاوت معنی‌داری بین تیمار آهن+ روی و آهن + منگنز وجود نداشت. قاسمی فسایی و رونقی[3] (۲۰۰۸) گزارش دادند که کاربرد آهن می‌تواند غلظت آهن را در دانه سویا افزایش دهد، اما غلظت منگنز در دانه را کاهش می‌دهد. این نتایج نشان داد که محلول‌پاشی آهن به صورت منفرد، غلظت روی و منگنز در دانه را کاهش می‌دهد، در حالی‌که محلول‌پاشی ترکیبی آهن و روی، علاوه بر افزایش میزان آهن، محتوای روی دانه را نیز افزایش داد، اما میزان منگنز در دانه روند کاهشی داشت (جدول ۴). این نتایج با نظر رینگل و رومهلد[4] (۲۰۱۲) مطابقت دارد که گزارش دادند مقاومت به کمبود روی در گندم با جذب و انتقال آهن به ساقه ارتباط

1. Soure & Bakhtiarizade
2. Vaghar
3. Ghasemi-Fasaei & Ronaghi
4. Rengel and Romheld

دارد و کمبود روی باعث کاهش سرعت انتقال آهن در ساقه می‌شود. استدلال کوچیان[5] (۱۹۹۱) بر آن بود که حرکت آهن در آوند آبکش کمتر از روی می‌باشد. همچنین مارالیان[6] (۲۰۰۹) گزارش داد که کاربرد روی و آهن می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر غلظت روی و آهن دانه داشته باشد.

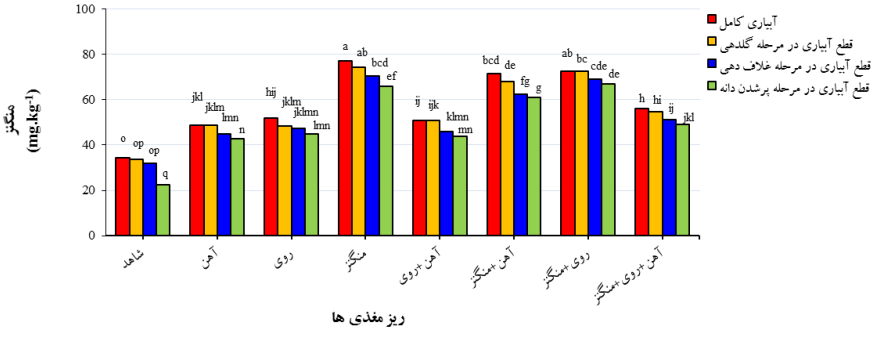
اگرچه محلول‌پاشی منگنز به تنهایی تأثیر چندانی بر غلظت روی و آهن دانه ندارد، اما بر غلظت منگنز دانه بسیار مؤثر بود و غلظت منگنز دانه نسبت به دیگر تیمارها افزایش بیشتری داشت (جدول ۴). نتایج مشابهی توسط پهلوان‌راد[7] و همکاران (۲۰۰۹) گزارش شده است. برخلاف دو عنصر آهن و منگنز که با محلول‌پاشی منفرد آن‌ها محتوای آهن و منگنز افزایش بیشتری داشت، تیمار ترکیبی روی+منگنز به طور معنی‌داری غلظت روی در دانه را ۹/۷ درصد بیشتر از کاربرد روی به تنهایی افزایش داد (جدول ۴). اثر برهم‌کنش تیمارهای آزمایشی بر غلظت عنصر روی در دانه سویا نشان داد که در شرایط عدم تنش، محلول‌پاشی نانو کلات‌ها باعث افزایش غلظت روی در دانه شده است. بیشترین غلظت روی از تیمار روی + منگنز (۷۲/۶۶) و پس از آهن + روی (۶۷/۱۲ میلی گرم در کیلوگرم) به دست آمد. تفاوت معنی‌داری بین تیمار آهن + روی و روی وجود نداشت. تیمار روی + منگنز در شرایط تنش در مرحله گلدهی (۶۹/۹۲ میلی گرم در کیلوگرم) و با بروز تنش در مرحله غلاف‌دهی و شروع پر شدن دانه تیمار آهن + روی (۶۶/۳۶ و ۶۲/۹۷ میلی گرم در کیلوگرم)، غلظت روی در دانه را بیشتر از سایر تیمارها افزایش داد (نمودار ۳).



نمودار ۳- اثر برهم‌کنش رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات‌ها بر غلظت روی در دانه سویا (میانگین دو سال) ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

5. Kochian
6. Maralian
7. Pahlavan-Rad

در شرایط آبیاری کامل، غلظت منگنز در دانه بیشتر تحت تأثیر تیمار منگنز (۷۷/۲۶ میلی گرم در کیلوگرم) قرار گرفت و افزایش نشان داد. این افزایش با اندکی اختلاف نسبت به تیمار آهن + منگنز (۷۲/۶۶ میلی گرم در کیلوگرم) به دست آمد. با اعمال تنش در مرحله گلدهی و غلاف‌دهی، غلظت منگنز دانه همانند تیمار آبیاری کامل، بیشتر تحت تأثیر تیمار منگنز (۷۴/۳۸ و ۷۰/۳۱ میلی گرم در کیلوگرم) قرار گرفت. اگرچه از نظر تأثیر بر غلظت منگنز دانه بین تیمارهای روی + منگنز و منگنز تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما نانو کلات روی + منگنز با تعدیل بیشتر اثر تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه غلظت منگنز دانه را بیشتر از دیگر تیمارها افزایش داد (نمودار ۴).



نمودار ٤- اثر برهم‌کنش رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانو کلات‌ها بر غلظت منگنز در دانه سویا (میانگین دو سال)
ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌داری می‌باشند.

٤. نتیجه‌گیری

تنش خشکی بر عملکرد دانه سویا در تمام سطوح اثر معنی‌داری دارد. نتایج پژوهش نشان داد که اثر تنش در مرحله تشکیل غلاف و پس از آن در مرحله پر شدن بذر بیشتر بود و با کاهش غلظت کلروفیل و فلورسانس کلروفیل همراه بود. به دلیل کاهش طول دوره پر شدن بذر و عدم جذب کافی عناصر ریز مغذی، اثر تنش در مرحله غلاف‌دهی و پر شدن بذر نسبت به مرحله گلدهی بیشتر بود. نانو کلات‌های آهن، روی و منگنز می‌توانند با افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی، اثرات منفی تنش خشکی را کاهش دهند. در شرایط تنش خشکی نقش تیمارهای ترکیبی بیشتر و تیمارهای منفرد در شرایط بدون تنش موفق‌تر بودند. در بین عناصر ریزمغذی، نانوکلات آهن + روی مؤثرتر بود و تأثیر بیشتری بر افزایش عملکرد دانه داشت. تیمارهای روی + منگنز و آهن + منگنز در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

References

1. Assefa Y, Bajjalieh N, Archontoulis S, Casteel S, Davidson D, Kovács P & Ciampitti IA. Spatial Characterization of Soybean Yield and Quality (Amino Acids, Oil, and Protein) for United States, *Sci. Rep.* 2018; 8(2): 1-11. **DOI:** 10.1038/s41598-018-32895-0
2. Armand N, Amiri H & Ismaili A. Interaction of methanol spray and water deficit stress on photosynthesis and biochemical characteristics of Phaseolus vulgaris L. cv. Sadry. *Photochem. Photobiol*. 2015; 92(1): 102-110. **DOI:** 10.1111/php.12548
3. Souri MK & Hatamian M. Amino chelates in plant nutrition: a review. *J. Plant Nutr.* 2019; 42(1): 67-78. **DOI:** 10.1080/01904167.2018.1549671.
4. Rahbarian R, Khavari-nejad R, Ganjeali A, Bagheri AR & Najafi F. Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer Arietinum* L.) genotypes. *Acta Biologica Cracoviensia-Series Botanica*. 2011; 53(1): 47-56. **DOI:** 10.2478/v10 182-011-0007-2
5. Souri MK & Yaghoubi Sooraki F. Benefits of organic fertilizers spray on growth quality of chili pepper seedlings under cool temperature. *J. Plant Nutr.* 2019; 42(6): 650-656. **DOI:** 10.1080/019 04167.2019.1568461.
6. Downie A, Myazaki S, Bohnert H. John P, Coleman J, Parry M & Haslam R. Expression profiling of the response of Arabidopsis thaliana to methanol stimulation. *Phytochem*. 2004; 65(16): 2305-2316. **DOI:** 10.1016/j.phytoche m.2004.07.006
7. Guo P, Baum S, Grando S, Ceccarelli G, Bai R, Li M, Von Korff RK, Varshney A & Valkoun J. Differentially expressed genes between drought-tolerant and drought-sensitive barley genotypes in response to drought stress during the reproductive stage. *J. Exp. Bot.* 2009; 60(12): 3531-3544. **DOI:** 10. 1093/jxb/erp194.
8. Sikder S, Foulkes J, West H, De J Silva, Gaju O, Greenl A & Howell P. Evaluation of photosynthetic potential of wheat genotypes under drought condition. *Photosynthetica*. 2015; 53(1): 47-54. **DOI:** 10.1007/s11099-015-0082-9
9. Bhardway R & Singhal G. Effect of water stress on photochemical activity of chloroplasts during greening etiolated barley seedlings. *Plant Cell Physiol*. 1981; 22(2): 155-162. **DOI:** 10.1093/ oxfordjournals.pcp.a076152
10. Behra RK, Mishra PC & Choudhury NK. High irradiance and water stress induce alterations in pigment composition and chloroplast activities of primary wheat leaves. *J. Plant Physiol*. 2002; 159(9): 967-973. **DOI:** doi.org/10.1078/0176-1617-00823
11. Xia J, Li Y & Zou D. Effect of salinity stress on PSII in Ulva lactuca as probed by chlorophyll flouresence measurements. *Aquat. Bot*. 2004; 80(2): 129-137. **DOI:** 10.1016/j.aquab ot.2004.07.006
12. Lu CM & Vonshak A. Effect of salinity stress on photosystem II function in cyanobacterial spirulina platensis cells. *Physiol. Plant*. 2002; 114(3): 405-413. **DOI:** 10.1034/j.1399-3054.2002.1140 310.x
13. Bissati KE, Delphin E, Murata N, Etienne AL & Kirilovsky D. Photosystem II fluorescence quenching in the cyanobacterium Synechocystis PCC 6803: involvement of

two different mechanisms. *Biochemicaet Biophysica Acta*. 2000; 1457(3): 229-242. **DOI:** 10.1016/S0005-2728(00) 00104-3

14. Kruk J, Czytko HH, Oettmeier W & Trebest A. Tocopherol as singlet oxygen scavenger in photosystem II. *J. Plant Physiol*. 2005; 162(7): 749-757. **DOI:** 10.1016/j.jplph.2005.04.020
15. Yordanov I, Velikova V & Tsonev T. Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulg. J. Plant Physiol*. 2000; 38(1): 171-186.
16. Mehata P, Jajoo A, Mathur S & Bharti S. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on photosystem II in wheat leaves. *Plant Physiol. Biochem*. 2010; 48(1): 16-20. **DOI:** 10.1016/j. plaphy.2009.10.006
17. Bertamini M, Muthuchelian K & Nedunchezhian N. Iron deficiency induced changes on the donor site of PS II in field grown grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) leaves. *Plant Sci*. 2002; 162(4): 599-605. **DOI:** 10.1016/S0168-9452(01) 00604-5
18. Donnini S, Castagna A, Guidi L, Zocchi G & Ranieri A. Leaf responses to reduced iron availability in two tomato genotypes: T3238FER (iron-efficient) and T3238fer (iron-inefficient). *J. Plant Nutr*. 2003; 26(10): 2137-2148. **DOI:** 10.1081/pln-120024270
19. Bienfait HF & Van der Mark F. *Phytoferritin and its role in iron metabolism.* In: Robb DA, Pierpoint WS. eds. Metals and Micronutrients. Uptake and Utilization by Plants. London: Academic Press, 1983: 111-123.
20. Doncheva S, Poschenrieder C, Stoyanova Z, Georgieva K, Velichkova M & Barceló J. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. *Environ. Exp. Bot*. 2009; 65(1): 189-197. **DOI:** 10.1016/j.envexpbot.2008.11.006
21. Marschner H. *Mineral Nutrition of High Plant*. 3th ed. Academic press, 2012.
22. Fageria NK. *The use of Nutrients in Crop Plants.* CRC Press, Boca Raton, Florida. 2009: 30. **DOI:** 10.1093/aob/mcp227
23. Li Q, Chen LS, Jiang HX, Tang N, Yang LT, Lin ZH & Yang GH. Effects of manganese-excess on CO_2 assimilation, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/ oxygenize, carbohydrates and photosynthetic electron transport of leaves, and antioxidant systems of leaves and roots in Citrus grand is seedlings. *BMC. Plant Biol.* 2010; 10(1): 1-16. **DOI:** 10.1186/1471-2229-10-42
24. Nickelsen J & Rengstl B. Photosystem II assembly: From cyanobacteria to plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 2013; 64(1): 609-35. **DOI:** 10.1146/annurev-arplant-050312-120124
25. Izaguirre-Mayoral ML & Sinclair TR. Variation in Manganese and Iron Accumulation among Soybean Genotypes Growing on Hydroponic Solutions of Differing Manganese and Nitrate Concentrations. *J. Plant Nutr*. 2005; 28(3): 521-535. **DOI:** 10.1081/pln-200049204
26. DeRosa MC, Monreal C & Schnitzer MR. Walsh and Y. Sultan. Nanotechnology in fertilizers. *Nat. Nanotechnol*. 2010; 5(2): 91. **DOI:** 10.1038/nnano.2010.2
27. Subramanian KS & Manikandan A. Thirunavukkarasu M, Rahale CS. Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. *Nano.Food Agric*. 2015; 3(1): 69-80.

DOI: 10.1007/978-3-319-14024-7-3

28. Liu R & Lal R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ.* 2015; 514(1): 131-139. **DOI:** 10.1016/j.scit oten v.2015.01.104
29. Chahal AS, Madgulkar AR, Kshirsagar SJ, Bhalekar MR, Dikpati A & Gawli P. Amorphous nanoparticles for solubility enhancement. *J. Adv. Pharm. Sci.* 2012; 2(1): 167-178.
30. Erdal I, Kepenek K & Kizilgos I. Effect of foliar iron applications at different growth stages on iron and some nutrient concentrations in strawberry cultivars. *Turk. J. Agric.* 2004; 28(1): 421-427.
31. Movahhedy-Dehnavy M, Modarres-Sanavy SAM & Mokhtassi-Bidgoli A. Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Ind. Crops Prod.* 2009; 30(1): 82-92. **DOI:** 10.1016/j.indcrop. 2009.02.004
32. Bennett MJ, Rhetoric E, Hicks DR, Naeve SL & Bennett NB. *The Minnesota soybean field book. St Paul*. MN: University of Minnesota Extension Service.2014:79.
33. Fouilleux G. Increase of Bradyrhizobium japonicum numbers in soils and enhanced nodulation of soybean (*Glycine max* (L.) merr.) using granular inoculants amended with nutrients. *FEMS Microbiol Ecol*. 1996; 20(3): 173-183. **DOI:** 10.1016/0168-6496(96)00028-1
34. Kacar B. *Plant nutrition application guide, Ankara Univ. Agricultural*. Fac. Pub: 900, Application Guides: 214. Ankara, Turkey, 1984:47-79.
35. Wijewardana C, Reddy KR & Bellaloui N. Soybean seed physiology, quality, and chemical composition under soil moisture stress. *Food Chem*. 2018; 278(1): 92-100. **DOI:** 10.1016/j.food chem. 2018.11.035
36. Ravi S, Channal HT, Hebsur NS, Patil BN & Dharmatti PR. Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Karnataka J. Agric. Sci*. 2008; 21(3): 382-385.
37. Rose LA, Feltion WL & Banks LW. Responses of four soybean variations to foliar zinc fertilizer. Aust. *J. Exp. Agric.* 2002; 21: 236-240.
38. Khan HR, McDonald GK & Rengel Z. Zn fertilization improves water use efficiency, grain yield and seed Zn content in chickpea. *Plant Soil*. 2003; 249(2): 389-400. **DOI:** 10.1023/a:1022808323744
39. Ghasemian V, Ghalavand A, Soroosh Zadeh A & Pirzad A. The effect of iron, zinc and manganese on quality and quantity of soybean seed. *J. Phytol.* 2010; 2(11): 73-9.
40. Chibba IM, Nayyar VK & Kanwar JS. Influence of mode and source of applied iron on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) in a typic ustochrept in Punjub, India. *Int. J. Agric. Biol*. 2007; 9(2): 254-256.
41. Yousefi M & Zandi P. Effects of foliar application of zinc and manganese on yield of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) under two irrigation patterns. *Journal of Polish Agricultural Universities*. 2012; 15(4): 1505-1513.

42. Taiz L & Zeiger E. The Benjamin Cumming Publishing Company. *Plant Physiol*. 2001; 91(6): 379. **DOI:** 10.1093/aob/mcg079
43. Zhao GQ, Ma BL & Ren CZ. Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop Sci.* 2007; 47(1): 123-131. **DOI:** 10.21 35/cropsci2006.06. 0371
44. Anjum F, Yaseen M, Rasool E, Wahid A & Anjum S. Water stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). II. Effect on chemical composition and chlorophyll contents. *Pak. J. Agric. Sci.* 2003; 40(2): 41-49.
45. Kafi M, Borzooei A, Salehi M, Kamandi A & Maassoumi A. Nabati. Plant environmental stress physiology. *Mashhad University Jihad Press*, 2009: 502. [In Persian]
46. Ahmadpour R, Hosseinzadeh SR, Armand N & Chashiani S. Evaluation of growth features, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes activity of lentils cultivars in response to water stress. *Nova Biologica Reperta*. 2017; 4(3): 226-235. [In Persian]
47. Pagter M, Bragato C & Brix H. Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquat. Bot.* 2005; 81(4): 285-299. **DOI:** 10.1016/j.aquabot.2005.01.002
48. Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. Second edition, Academic Press Inc London. *Ann. Bot.* 1995; 78(4): 527-528. **DOI:** 10.1006/anbo.1996.0155
49. Souri MK & Bakhtiarizade M. Biostimulation effects of rosemary essential oil on growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Scientia Horticulture*. 2019; 243: 472-476. **DOI:** 10.1016/j.scienta.2018. 08.056.
50. Vaghar MS, Sayfzadeh S, Zakerin HR, Kobraee S & Valadabadi SA. Foliar application of iron, zinc, and manganese nano-chelates improves physiological indicators and soybean yield under water deficit stress. *J. Plant Nutr.* 2020; 43(18): 2740–2756. **DOI:** 10.1080/01904167.2020. 1793180
51. Babaeian M, Tavassoli A, Ghanbari A, Esmaeilian Y & Fahimifard M. Effects of foliar micronutrient application on osmotic adjustments, grain yield and yield components in sunflower (*Alster cultivar*) under water stress at three stages. *Afr. J. Agric. Res*. 2011; 6(5): 1204-1208. **DOI:** 10.5897/AJAR10. 928
52. Karim MR, Zhang YQ, Zhao RR, Chen XP, Zhang FS & Zou CQ. Alleviation of drought stress in winter wheat by late foliar application of zinc, boron, and manganese. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2012; 175(1): 142-151. **DOI:** 10.1002/jpln.201
53. Jiang W, Struik PC, Van Keulen H, Zhao M, Jin LN & Stomph TJ. Does increased zinc uptake enhance grain zinc mass concentration in rice?. *Ann. Appl. Biol.* 2008; 153(1): 135-147. **DOI:** 10.1111/j.1744-7348.2008.00 243.x
54. Ghasemi-Fasaei R & Ronaghi A. AInteraction of iron with copper, zinc, and manganese in wheat as affected by iron and manganese in a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 2008; 31(5): 839-848. **DOI:** 10.1080/01904160802 043148
55. Rengel Z & Romheld V. Differential tolerance to Fe and Zn definition in wheat germplasm. *Euphytica*. 2012; 113(3): 219-225. **DOI:** 10.1023/a:1003965007305
56. Kochian LV. *Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants*. *In:*

Micronutrients in Agriculture. JJ. Mortvedt, Cox FR & Shuman LM. Welch RM. Soil Sci. Soc. Am. Madison. 1991; 229-296. **DOI:** 10.2136/sssabookser4.2ed.c8

57. Maralian H. Effect of foliar application of Zn and Fe on wheat yield and quality. *Afr. J. Biotechnol*. 2009; 8(24): 6795-6798. **DOI:** 10.4314/ajb.v8i24.68671
58. Pahlavan-Rad MR & Pessarakli M. Response of wheat plants to zinc, iron, and manganese applications and uptake and concentration of zinc, iron, and manganese in Wheat grains. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2009; 40(1): 1322-1332.
DOI: 10.1080/00103620 902761262