University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 4, pp. 1105-1121 (Winter 2024)

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5297.2135

Original article

Response of physiological growth indices and water use efficiency of soybean to mycorrhiza and zinc sulfate application method under water stress conditions

P. Sohrabi Noor[1], M.A. Aboutalebian[2*], J. Hamzei[2]

1. Former graduate student of Agronomy and Plant Breeding, University of Bu Ali Sina, Hamedan, Iran
2. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, University of Bu Ali Sina, Hamadan, Iran

Received 9 May 2022; Accepted 11 July 2022

Extended abstract

Introduction

Soybean (*Glycine max* L.) is one of the most important oilseeds in the world due to its 18 to 22% seed oil and high protein content (36-38%). Meanwhile drought stress is one of the important factor limiting its growth and yield. Drought stress limits root growth and reduces the mobility of important micro-nutrients especially zinc in the soil. Application of zinc sulfate fertilizer increases physiological growth parameters, grain yield and water use efficiency in soybeans. Also mycorrhizal colonization in plants increases growth, improves yield, and increases the plants resistance to drought stress. This study aims to evaluate the effect of mycorrhiza and zinc sulfate fertilizer application method on some soybean growth physiological indices and its water use efficiency under soil moisture deficit stress.

Materials and methods

The experiment was performed as a factorial experiment in the form of randomized complete blocks with three replications. First factor was moisture stress at three levels of no-stress, mild stress and severe stress (irrigation after 60, 90 and 120 mm evaporation from Class A pan, respectively). Second factor was arbuscular mycorrhiza (*Funneliformis mosseae*) in two levels of application and no-application and third factor was the application method of zinc sulfate fertilizer in three levels of no-application, soil application and foliar feeding. To evaluate the response of growth indices of soybean, plant samples were prepared during the growing season and their leaf area and dry matter were measured. Water use efficiency was also obtained from the ratio of grain yield to the volume of water consumed. During flowering stage, the percentage of mycorrhiza colonization was measured and grain yield was obtained by harvesting two square meters from each plot.

Results and discussion

In this experiment, severe moisture stress shortened the growth period of soybeans. The results showed that at all levels of moisture stress, inoculation with mycorrhiza increased leaf area index, crop growth rate, water use efficiency and grain yield. Application of mycorrhiza and foliar feeding of zinc sulfate increased maximum leaf area index, maximum crop growth rate and water use efficiency by 69, 98 and 112%, respectively. In the absence of mycorrhiza, soil application of zinc sulfate had no effect on maximum leaf area index and maximum crop growth rate, but the use of mycorrhiza led to a 15 and 20% increase in these indices by soil application of zinc sulfate compared to no zinc sulfate use. Severe and

* Corresponding author: Mohammad Ali Aboutalebian; E-Mail: m.aboutalebian@basu.ac.ir

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

moderate moisture stresses in no-application of mycorrhiza and no zinc sulfate reduced the total dry matter by 47.22 and 63.04%, respectively, but the application of mycorrhiza in these treatments has reduced the severity of these effects and led to increase of 111.20% in total dry matter. The highest colonization of mycorrhiza occured in moderate moisture stress (65.33%). Soil application of zinc sulfate reduced the colonization of mycorrhiza even compared to the no-application of zinc sulfate fertilizer. In this study, the highest percentages of mycorrhizal colonization occured in moderate moisture stress and foliar application of zinc sulfate by 64 and 59%, respectively. Foliar feeding of zinc sulfate compared to no-zinc sulfate, under severe moisture stress increased grain yield by 68% (1100 kg ha^{-1}). No-application of mycorrhiza led to no difference between soil use and no-application of zinc sulfate in soybean yield. Mycorrhiza in no-moisture stress, moderate stress and severe stress increased water use efficiency by 80.49, 183.33, 275% respectively, compared to no-application of mycorrhiza.

Conclusion

According to the results, foliar feeding of zinc sulfate is more efficient than soil application of zinc sulfate, but this efficiency decreases during moisture stress. Application of mycorrhiza in addition to reducing the effects of moisture stress can increase the efficiency of zinc sulfate fertilizer especially under foliar feeding conditions.

Keywords: Colonization percent, Crop growth rate, Grain yield, Leaf area index, Total dry weight

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲

https://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5297.2135

مقاله پژوهشی

واکنش شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد و کارایی مصرف آب سویا به مایکوریزا و روش مصرف سولفات روی تحت شرایط تنش رطوبتی

پویا سهرابی‌نور[۱]، محمدعلی ابوطالبیان[۲*]، جواد حمزه‌ئی[۲]

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا
۲. دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
درصد همزیستی
سرعت رشد
شاخص سطح برگ
عملکرد دانه
ماده خشک کل

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ انتشار:
زمستان ۱۴۰۲

۱۶(۴): ۱۱۰۵-۱۱۲۱

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر تلقیح با قارچ مایکوریزا و شیوه مصرف کود سولفات روی بر تعدادی از شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد، کارایی مصرف آب و عملکرد دانه سویا آزمایشی در شرایط تنش رطوبتی انجام شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا اجرا شد. عوامل آزمایش عبارت بودند از تنش رطوبتی در سه سطح آبیاری پس از ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس (A)، شیوه مصرف کود سولفات روی با سه روش محلول‌پاشی، مصرف خاکی و عدم مصرف کود و قارچ مایکوریزا (*Funneliformis mosseae*) در دو سطح کاربرد و عدم کاربرد. نتایج نشان داد در تمام سطوح تنش رطوبت، تلقیح با مایکوریزا موجب افزایش شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، کارایی مصرف آب و عملکرد دانه گردید. کاربرد مایکوریزا تحت شرایط محلول‌پاشی سولفات روی، بیشینه شاخص سطح برگ، بیشینه سرعت رشد محصول و کارایی مصرف آب را به ترتیب ۶۹، ۹۸ و ۱۱۲ درصد افزایش داد. در این پژوهش بیشترین درصد همزیستی مایکوریزایی در تیمارهای تنش متوسط رطوبت و محلول‌پاشی سولفات روی به ترتیب ۶۴ و ۵۹ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد محلول‌پاشی سولفات روی در شرایط تنش شدید رطوبت، عملکرد دانه را ۶۸ درصد افزایش داد و به ۱۱۰۰ کیلوگرم در هکتار رسانید. به‌طورکلی تلقیح با مایکوریزا و محلول‌پاشی روی تحت شرایط تنش رطوبتی عوامل مهمی در بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد، کارایی مصرف آب و عملکرد سویا هستند.

مقدمه

سویا با نام علمی *Glycine max* L. گیاهی است دیپلوئید و یک‌ساله از تیره نخود (Fabaceae). سویا به دلیل دارا بودن ۱۸ تا ۲۲ درصد روغن دانه و بالا بودن درصد پروتئین (۳۶ تا ۳۸ درصد) از مهم‌ترین دانه‌های روغنی موردتوجه در سراسر جهان به شمار می‌رود (Hu et al., 2019). این دانه روغنی در سطح وسیعی از مناطق مختلف جهان کشت می‌شود. سطح زیر کشت سویا در دنیا حدود ۱۲۰ میلیون هکتار، با تولید ۳۳۴ میلیون تن و متوسط عملکرد آن ۲/۸ تن در هکتار است و میزان تولید آن در ایران در سال ۱۳۹۸ حدود ۶۸ هزار تن بوده است (FAO, 2019). سهم ایران از تولید سویا در جهان تنها حدود ۰/۰۲ درصد است و میزان واردات آن در سال ۱۳۹۹، ۲ میلیون تن بوده است. (Oilepa, 2019). کمبود رطوبت یکی از عوامل مهم محدودکننده رشد سویا به شمار می‌رود (Ezzati Lotfabadi et al., 2021). ایران به دلیل بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر و تبخیر ۱۸۰۰ میلی‌متر در سال جزو مناطقی است که تنش خشکی در مزارع آن بسیار شایع است (Habibzadeh et al., 2012). در کنار عوارض مستقیم تنش خشکی بر رشد گیاهان، کاهش میزان رطوبت خاک

* نگارنده پاسخگو: محمدعلی ابوطالبیان. پست الکترونیک: m.aboutalebian@basu.ac.ir

همچنین موجب کاهش تحرک عناصر غذایی مهم ازجمله عناصر کم‌مصرف مانند روی در خاک می‌شود و با توجه به محدودیت رشد ریشه در شرایط کمبود رطوبت، گیاهان به‌طور مضاعفی با کمبود این عنصر مواجه می‌شوند (Peymaneh and Zarei, 2013). عنصر روی در ساخت اکسین، تشکیل بسیاری از آنزیم‌ها مانند کربنیک آنهیدراز، متابولیسم فسفات، ساخت RNA، ریبوزوم‌ها و حفظ انسجام غشاهای سلولی نقش کلیدی دارد. علاوه بر این کمبود روی در سویا موجب کوچکی برگ و کلروز در برگ‌های جوان می‌شود (Malakouti, 2015). فاتح و همکاران (Fateh et al., 2012) گزارش کردند مصرف کود سولفات روی در شرایط تنش و عدم تنش موجب افزایش شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در سویا گردیده است.

مایکوریزا یکی از مهم‌ترین قارچ‌های موجود در اغلب خاک‌ها می‌باشند که حدود ۷۰ درصد از توده زنده جامعه میکروبی خاک را میسیلیوم‌های این قارچ‌ها تشکیل می‌دهند. همزیستی گیاهان با این قارچ‌ها موجب افزایش رشد، بهبود عملکرد، جذب بیش‌تر عناصر غذایی کم‌تحرک خاک مانند روی و بالا رفتن مقاومت گیاهان در برابر انواع تنش‌های محیطی ازجمله خشکی می‌شود (Peymaneh and Zarei, 2013). در آزمایش‌های پیشین، افزایش جذب فسفر، روی، مس و منگنز در سویا (Ezzati Lotfabadi et al., 2021) و افزایش جذب فسفر و نیتروژن در آفتابگردان (Heidari and Karami, 2014) تحت تأثیر کاربرد مایکوریزا گزارش شده است؛ بنابراین در تحقیق پیش رو به بررسی اثرات مایکوریزا و شیوه مصرف کود سولفات روی بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد، کارایی مصرف آب و عملکرد سویا در شرایط کمبود رطوبت خاک پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در تابستان سال ۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینای همدان انجام شد. میانگین دمای دوره رشد ۲۲/۵۸ درجه سلسیوس و حداکثر و حداقل دما به ترتیب ۳۵/۶ و ۷/۹ درجه سلسیوس بود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil

بافت خاک Soil texture	روی Zn	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	کربن آلی OC	اسیدیته pH	شوری EC
	---------- mg kg^{-1} ----------			-------- % --------			dS m^{-1}
لومی رسی clay loam	0.36	104	6.2	0.11	1.29	8.13	0.145

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول: تنش رطوبتی در سه سطح عدم تنش، تنش ملایم و تنش شدید به ترتیب آبیاری پس از ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشت کلاس A؛ فاکتور دوم: مایکوریزا آربوسکولار در دو سطح کاربرد و عدم کاربرد و فاکتور سوم: شیوه مصرف سولفات روی در سه سطح عدم مصرف، مصرف خاکی و محلول‌پاشی سولفات روی در نظر گرفته شد. رقم سویا مورداستفاده هابیت بود که در تاریخ ۱۷ تیر ۱۳۹۸ در کرت‌هایی با ابعاد ۶×۳ متر با ۵ ردیف کشت به فاصله ۵۰ سانتی‌متری با تراکم ۴۰ بوته در مترمربع کشت شد. گونه مایکوریزا (*Funneliformis mosseae*) از شرکت زیست فناوران توران شاهرود با نام تجاری مایکوپرسیکا تهیه شد. این کود در هر گرم خود حاوی ۱۵۰ اسپور قارچ *فانلیفارمیس موسهآ* بود که به میزان ۲۰ گرم در هر مترمربع به‌صورت نواری هنگام کاشت در کنار بذر مصرف شد. همچنین ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات از منبع سوپر فسفات تریپل به‌صورت نواری و ۶۰ کیلوگرم کود نیتروژن از منبع اوره به‌صورت پخش به‌عنوان آغازگر به خاک افزوده شد. جهت اعمال تیمار مصرف خاکی سولفات روی کود مزبور به‌صورت خاک‌پخش به میزان ۴۰ کیلوگرم در هکتار پیش از کاشت استفاده شد. تیمار محلول‌پاشی سولفات روی نیز به میزان ۲۰۰ لیتر در هکتار، طی دو مرحله رشد سویا (V3 و R1) با غلظت ۵ در هزار سولفات روی انجام گرفت (Malakouti, 2015). به‌منظور اندازه‌گیری شاخص‌های رشد، ۳۵ روز پس از کاشت، در فاصله زمانی هر ۱۰ روز یک‌بار (درمجموع پنج بار در طول رشد) از تمامی کرت‌های آزمایشی

نمونه‌گیری تخریبی انجام گرفت. در هر مرحله پنج بوته از هر کرت با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای و به‌صورت تصادفی برداشت شد. برای تعیین روند تغییرات شاخص‌های فیزیولوژیکی زیر (روابط ۱ تا ۴) در طول دوره رشد، از لگاریتم طبیعی داده‌های شاخص سطح برگ و ماده خشک کل (برحسب گرم بر مترمربع) استفاده شد (Monte et al., 2013).

ماده خشک کل از رابطه زیر محاسبه شد.

$$TDM=EXP(a+bT+cT^2) \quad [۱]$$

شاخص سطح برگ از رابطه زیر محاسبه شد.

$$LAI= EXP\ (a'+b'T+c'T^2) \quad [۲]$$

سرعت رشد محصول از رابطه زیر محاسبه شد.

$$CGR= NAR\times LAI \quad [۳]$$

سرعت جذب خالص از رابطه زیر محاسبه شد.

$$NAR=(b+2cT)\times EXP[(a-a')+(b-b')T+(c-c')\ T^2] \quad [۴]$$

در این معادله‌ها a, b, c, a', b', c' ضرایب معادلات رگرسیونی مربوطه و T زمان برحسب روز پس از کاشت است. داده‌های مربوط به پیک منحنی‌های شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول و ماده خشک کل نیز آنالیز واریانس و مقایسه میانگین شدند.

در مرحله گلدهی از ریشه‌های سه بوته سویا در هر واحد آزمایشی نمونه‌برداری شد و در آزمایشگاه به روش فیلیپس و هایمن (Phillips and Hayman, 1970) درصد همزیستی با مایکوریزا تعیین شد. به این منظور ریشه‌ها به مدت ۴۵ دقیقه توسط بن ماری در محلول ۱۰ درصد هیدروکسید پتاسیم حرارت دیده و پس از شفاف شدن و شستشو به مدت ۳ دقیقه در اسیدکلریدریک یک درصد، اسیدی شدند. برای رنگ‌آمیزی ریشه‌ها از محلول ۰/۰۵ درصد آنیلین بلو استفاده شد و درنهایت برای رنگ‌بری ریشه‌های غیر آلوده به قارچ از محلول لاکتوفنول استفاده شد درحالی‌که ریشه‌های آلوده به قارچ آبی ماندند و به این صورت درصد همزیستی مشخص شد. برای تعیین عملکرد دانه، با رعایت اثر حاشیه‌ای، سطحی معادل دو مترمربع در تاریخ ۲۸ مهر ۱۳۹۸ برداشت شد. برای محاسبه کارایی مصرف آب، از نسبت عملکرد دانه تولیدشده برحسب کیلوگرم در هکتار بر حجم آب مصرف‌شده برحسب مترمکعب در هکتار استفاده شد (Alizadeh, 2010). در زمان آبیاری با استفاده از رابطه ۵ مقدار آب لازم برای رسیدن به حد ظرفیت زراعی تعیین شد و با استفاده از کنتور حجمی، مقدار آب محاسبه‌شده به کرت‌ها داده شد (Mazaheri and Majnoon Hosseini, 2011).

$$V=(FC-P0)\times AS\times D\times 100 \quad [۵]$$

V: حجم آب برحسب مترمکعب در هکتار، FC: درصد رطوبت وزنی خاک در مرحله ظرفیت زراعی (۲۸/۵۶ درصد)، P0: درصد رطوبت وزنی خاک در زمان آبیاری، AS: وزن مخصوص ظاهری خاک (۱/۴۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب)، D: عمق توسعه یا گسترش ریشه (۳۰ سانتی‌متر)

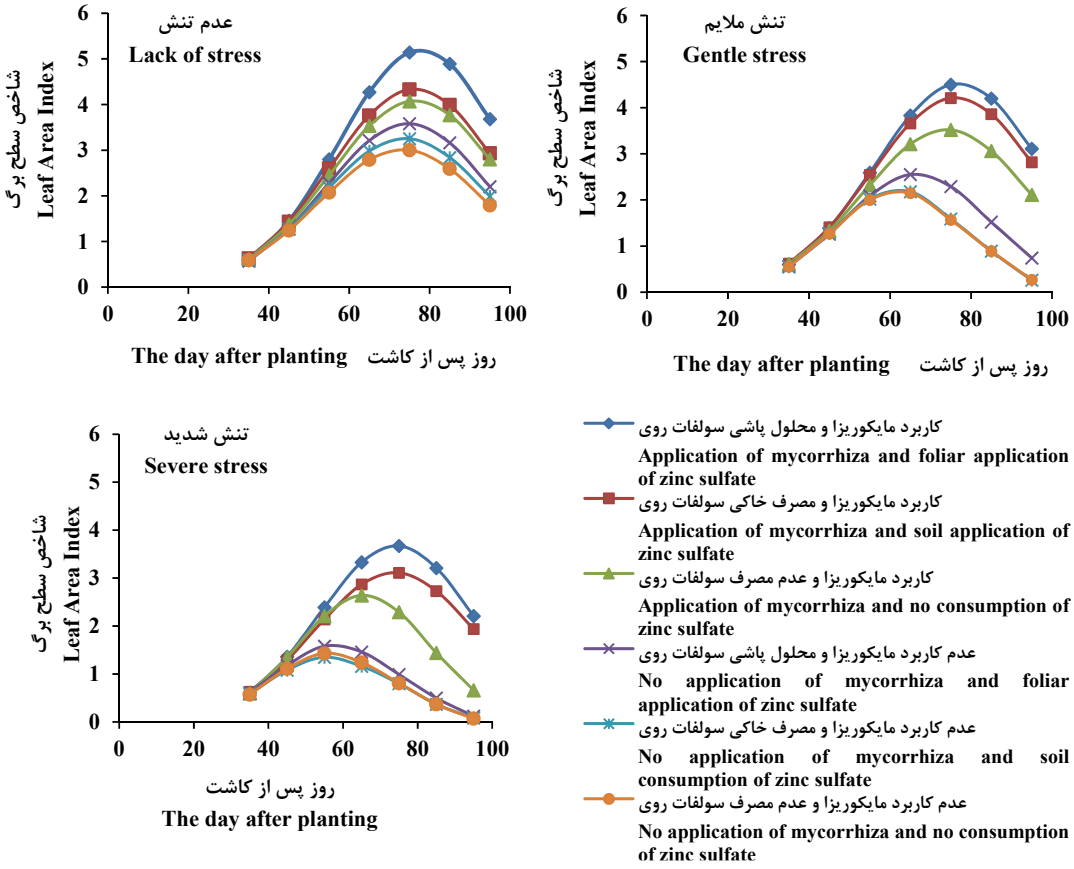
پس از کنترل نرمال بودن باقی‌مانده داده‌ها، تجزیه آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS ver 9.4 صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. همچنین برای مقایسه میانگین اثرات چندجانبه (برهم‌کنش فاکتورهای موردبررسی) از نرم‌افزار MSTATC استفاده شد. رسم نمودارها نیز با نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

بر اساس نمودارهای شکل ۱، شاخص سطح برگ در مراحل ابتدایی رشد گیاه کم بوده است که دلیل آن کم بودن تعداد و اندازه برگ‌ها بود (Aboutalebian and Moqisaei, 2016)، ولی با ادامه رشد گیاه و افزایش اندازه و تعداد برگ‌ها مقدار آن افزایش یافت و در زمان گلدهی به حداکثر خود رسید اما هنگامی‌که گیاه وارد دوره پیری گردید شاخص سطح برگ آن به‌تدریج کاهش یافت (شکل ۱). عوامل محیطی به‌ویژه تنش رطوبتی می‌توانند با کوتاه کردن دوره رشد در روند تغییرات شاخص سطح برگ طی رشد گیاه اثرات قابل‌توجهی ایجاد کنند (Kanani et al., 2016). در این آزمایش شاخص سطح برگ سویا در گیاهان غیر مایکوریزایی در شرایط تنش رطوبتی شدید و کاربرد دو شیوه‌های مصرف سولفات روی نسبت به عدم تنش و تنش ملایم، سریع‌تر به حداکثر خود رسید. به عبارتی، تنش رطوبتی شدید باعث کوتاه شدن دوره رشد گیاه سویا شد (شکل ۱ و جدول ۳).

البته در گیاهان مایکوریزایی در شرایط تنش شدید رطوبت و عدم مصرف سولفات روی، شاخص سطح برگ سویا دیرتر به حداکثر خود رسید (۶۵ روز پس از کاشت در مقابل ۷۵ روز پس از کاشت) (شکل ۱ و جدول ۳).



شکل ۱. روند تغییرات شاخص سطح برگ سویا تحت تأثیر مایکوریزا، شیوه مصرف سولفات روی و تنش رطوبتی

Fig. 1. Trend of changes in soybean leaf area index under the influence of mycorrhiza, zinc sulfate application method and moisture stress

کاربرد مایکوریزا و مصرف سولفات روی به هر دو روش خاکی و محلول‌پاشی در مقایسه با کاربرد تنهای مایکوریزا نیز در طولانی‌تر شدن دوره رشد سویا مؤثر بود به‌نحوی‌که در تنش شدید رطوبت، ۷۵ روز پس از کاشت گیاه سویا به حداکثر شاخص سطح برگ خود رسید (شکل ۱ و جدول ۳). به نظر می‌رسد مایکوریزا با افزایش سطح مؤثر ریشه، موجب افزایش هدایت هیدرولیکی سیستم ریشه‌ای می‌شود (Habibzadeh et al., 2012). همچنین مایکوریزا با تغییر در قابلیت انعطاف‌پذیری سلول‌ها، بهبود پتانسیل آب و آماس برگ‌ها، باز نگه‌داشتن روزنه‌ها و افزایش تعرق می‌تواند موجب افزایش اثربخشی محلول‌پاشی روی شود (Sabannavar and Lakshman, 2008) که این خود می‌تواند به افزایش دوام برگ و طولانی‌تر شدن دوره رشد، منجر شود.

مطابق نتایج آنالیز واریانس (جدول ۲) تمامی اثرات اصلی و به‌جز اثر سه‌جانبه بر بیشینه شاخص سطح برگ سویا معنی‌دار شد، به‌طوری‌که تنش رطوبتی ملایم و شدید در تیمارهای عدم کاربرد مایکوریزا و عدم مصرف سولفات روی به ترتیب ۲۷/۹۵ و ۵۳/۷۳ درصد موجب کاهش سطح برگ شدند، ولی در تیمار کاربرد مایکوریزا و عدم مصرف سولفات روی افزایش ۴۰/۶۸ درصدی در عدم تنش،۷۴/۵۶ درصدی در تنش ملایم و ۱۱۰/۷۴ درصدی در تنش شدید نسبت به تیمار عدم کاربرد مایکوریزا و عدم مصرف سولفات روی مشاهده شد (جدول A5). شول و همکاران (Shool et al., 2015) گزارش نمودند که مایکوریزا سبب افزایش طول ریشه و تعداد برگ‌ها و درنتیجه افزایش سطح برگ گردیده است. در اثر دوجانبه مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی نیز کاربرد مایکوریزا نسبت به عدم کاربرد آن سبب افزایش ۶۴/۳۵ درصدی در شرایط محلول‌پاشی و ۷۱/۶۸ درصدی در شرایط مصرف خاکی سولفات روی شد که این امر می‌تواند ناشی از اثربخشی مایکوریزا در افزایش جذب روی توسط گیاه در تیمارهای مصرف روی باشد (جدول B5). اثربخشی کاربرد مایکوریزا در افزایش جذب سولفات روی در شیوه محلول‌پاشی

می‌تواند به دلیل اثر مایکوریزا در کنترل روزنه‌ای و باز نگه‌داشتن روزنه‌ها و آماس برگ‌ها و افزایش تعداد روزنه‌ها باشد (Sabannavar and Lakshman, 2008). عبدالله و همکاران (Abdallah et al., 2013) گزارش کرده‌اند که کاربرد مایکوریزا سبب افزایش تعداد روزنه‌های برگ آفتابگردان شد که همین امر می‌تواند کارایی محلول‌پاشی روی را در گیاهان مایکوریزایی افزایش دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد مایکوریزا سبب افزایش اثربخشی مصرف خاکی سولفات روی در سویا گردید (جدول B5). آقابابایی و همکاران (Aghababaei et al., 2011) گزارش کرده‌اند که کاربرد مایکوریزا در درخت بادام موجب افزایش روی اندام هوایی به میزان ۲۵ تا ۳۵ درصد و اندام زیرزمینی بین ۲۶ تا ۲۷ درصد شده است. آن‌ها دلیل این اثربخشی مایکوریزا در جذب سولفات روی را در تخلیه بیش‌تر خاک از روی براثر نفوذ ریسه‌های نازک قارچی در حفرات ریز خاک عنوان کرده‌اند.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تنش رطوبتی، قارچ مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی بر شاخص‌های رشد سویا

Table 2. Analysis of variance of the effect of moisture stress, mycorrhiza fungus and zinc sulfate application method on soybean growth indices

S.O.V منابع تغییرات	درجه آزادی df	بیشینه شاخص سطح برگ Maximum Leaf Area Index	بیشینه سرعت رشد محصول Maximum Crop Growth Rate	بیشینه ماده خشک کل Maximum Total Dry Matter	عملکرد دانه Grain yield	درصد همزیستی colonization percentage	کارایی مصرف آب Water Use Efficiency
بلوک Block	2	0.52**	5.06 ns	5030**	88900.3**	4.74**	0.007**
تنش رطوبتی Moisture stress (ST)	2	10.94**	26.32**	377324**	4814124**	314.4**	0.66**
مصرف سولفات روی ZnSo4 application method (Zn)	2	2.44**	61.63**	75296.9**	1568592**	104.7**	0.12**
مایکوریزا Mycorrhiza (MYC)	1	32.99**	903.48**	1297886**	16101551**	34403.1**	1.15**
تنش رطوبتی× سولفات روی ST×Zn	4	0.07*	3.01*	1549.5ns	86892.5**	0.18ns	0.01**
تنش رطوبتی × مایکوریزا ST×MYC	2	0.22**	11.52**	27134.5**	182622.9**	399.6**	0.01**
سولفات روی × مایکوریزا Zn×MYC	2	0.33**	9.46**	14904.9**	157977.4**	77.9**	0.009**
تنش رطوبتی × سولفات روی × مایکوریزا ST×Zn×MYC	4	0.04ns	1.82ns	3770.3**	22165.6ns	1.18ns	0.0009ns
خطای آزمایشی Error	34	0.02	1.01	907.4	14181.2	0.56	0.001
ضریب تغییرات C.V%	-	*4.73*	*7.85*	*6.8*	*8.87*	*2.48*	*9.43*

*، ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪، ۱٪ و عدم معنی‌داری است.

*,** and ns: It is significant at the level of 5%, 1% and non-significant, respectively.

نتایج مقایسه میانگین اثر دوجانبه تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی نشان داد که محلول‌پاشی و مصرف خاکی سولفات روی به ترتیب ۲۶/۷ و ۷/۴۸ درصد سطح برگ سویا را افزایش دادند (جدول C5). گزارش شده است که کمبود روی باعث اختلال در فتوسنتز و پرورده‌سازی کربن و

افزایش حساسیت گیاه به تنش خشکی می‌شود (Aboutalebian and Moqisaei, 2016).

سرعت رشد محصول

شکل ۲ نشان می‌دهد در اوایل دوره رشد به دلیل این‌که گیاه پوشش و سطح برگ کمی داشت، مقدار زیادی از تشعشع خورشید اتلاف شده و سرعت رشد گیاه پایین بود (Monte et al., 2013). با ادامه رشد گیاه و افزایش سطح برگ سرعت رشد محصول نیز افزایش یافت و به حداکثر خود رسید و درنهایت رو به کاهش گذاشت (شکل ۲ و جدول‌های ۳ و ۴). منفی شدن سرعت رشد محصول در مراحل پایانی رشد به دلیل انتقال مجدد مواد از اندام‌های رویشی به زایشی و ریزش برگ‌ها است (Habibzadeh et al., 2012). نتایج حاصل نشان داد که در بازه زمانی ۴۵ تا ۶۵ روز پس از کاشت سرعت رشد محصول روند کاهشی در پیش‌گرفته و تقریباً ۶۵ تا ۸۵ روز پس از کاشت مقدار آن به صفر رسید (شکل ۲ و جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳. ضرایب پیش‌بینی شاخص سطح برگ a' ±SE، b' ±SE، c' ±SE، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب تبیین (R^2)

Table 3. Leaf area index prediction coefficients a '± SE, b' ± SE, c '± SE, mean square error (MSE) and coefficient of determination (R^2)

تنش رطوبتی Moisture stress (mm)	مایکوریزا Mycorrhiza	Zinc sulfate application method	شیوه مصرف سولفات روی	a'±SE	b' ±SE	c' ±SE	MSE	R^2
60	تلقیح Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-5.51±0.19	0.18±0.007	-0.001±0.00006	0.0007	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-5.11±0.14	0.17±0.005	-0.001±0.00004	0.0004	0.99
		No use	عدم مصرف	-5.03±0.07	0.17±0.002	-0.001±0.00002	0.0001	0.99
	عدم تلقیح No Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-5.24±0.43	0.17±0.016	-0.001±0.0001	0.004	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-4.95±0.20	0.16±0.007	-0.001±0.00006	0.0009	0.99
		No use	عدم مصرف	-4.86±0.52	0.16±0.02	-0.001±0.0002	0.006	0.98
90	تلقیح Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-5.30±0.13	0.18±0.005	-0.001±0.00004	0.0003	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-5.11±0.14	0.17±0.005	-0.001±0.00004	0.0004	0.99
		No use	عدم مصرف	-5.082±0.08	0.17±0.0028	-0.001±0.00002	0.0001	0.99
	عدم تلقیح No Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-5.83±0.31	0.20□0.01	-0.001±0.0001	0.002	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-6.63±0.34	0.24±0.012	-0.002±0.0001	0.002	0.99
		No use	عدم مصرف	-6.53±0.24	0.24±0.008	-0.002±0.00007	0.001	0.99
120	تلقیح Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-5.14±0.27	0.171±0.01	-0.001±0.00008	0.001	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-4.64±0.09	0.15±0.003	-0.001±0.00003	0.0002	0.99
		No use	عدم مصرف	-5.89±0.16	0.214±0.006	-0.002±0.00005	0.0006	0.99
	عدم تلقیح No Iinoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-5.74±0.99	0.21±0.04	-0.002±0.0003	0.02	0.89
		Soil	مصرف خاکی	-5.60±0.11	0.21±0.004	-0.002±0.00003	0.0002	0.99
		No use	عدم مصرف	-6.44±1.13	0.24±0.041	-0.002±0.0004	0.03	0.90

با افزایش تنش رطوبتی سرعت رشد محصول سریع‌تر به حداکثر خود رسید به‌گونه‌ای که در تنش شدید در تیمارهای عدم کاربرد مایکوریزا تحت شرایط کاربرد هر دو شیوه مصرف سولفات روی در ۴۵ روز پس از کاشت سرعت رشد محصول به حداکثر رسید ولی در تنش ملایم و عدم تنش در تیمارهای نامبرده سرعت رشد محصول به ترتیب در ۵۵ و ۶۵ روز پس از کاشت به حداکثر خود رسید (شکل ۲ و جدول‌های ۳ و ۴). بااین‌وجود، کاربرد مایکوریزا سبب کاهش افت سریع سرعت رشد محصول بخصوص در شرایط تنش شد، به‌گونه‌ای که در گیاهان مایکوریزایی و در تنش ملایم و شدید سرعت رشد محصول به ترتیب ۶۵ و ۵۵ روز پس از کاشت به حداکثر خود رسید ولی کاربرد مایکوریزا در عدم تنش اثر ملموسی بر روی

کوتاه شدن روند سرعت رشد محصول نداشت (شکل ۲ و جدول‌های ۳ و ۴).

بیشینه سرعت رشد محصول به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی و دوجانبه قرار گرفت ولی اثر سه‌جانبه بر این ویژگی معنی‌دار نشد (جدول ۲). بیش‌ترین سرعت رشد محصول در اثر دوجانبه تنش رطوبتی و مایکوریزا متعلق به کاربرد مایکوریزا و عدم تنش است که مایکوریزا سبب افزایش ۴۸/۵۸ درصدی سرعت رشد محصول شد و در شرایط تنش شدید و تنش ملایم، سبب افزایش ۱۲۰/۳۴ و ۱۴۴/۴۷ درصدی سرعت رشد محصول نسبت به تیمارهای عدم کاربرد مایکوریزا در شرایط تنش مشابه شد (جدول A6) که می‌تواند ناشی از افزایش سطح برگ در این تیمار باشد. در آزمایشی بر روی ذرت مشخص شد که تیمارهای مایکوریزایی به علت فراهمی و جذب بیش‌تر عناصر غذایی بیش‌ترین سطح برگ، ماده خشک و درنتیجه سرعت رشد را نسبت به سایر تیمارها دارا بودند (Quchi, 2012). در اثر دوجانبه مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی نیز کاربرد مایکوریزا مانند شاخص سطح برگ موجب افزایش اثربخشی مصرف سولفات روی شد و سرعت رشد محصول را به ترتیب به‌طور میانگین ۹۵/۳۸ و ۹۰/۹۲ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد مایکوریزا و عدم مصرف سولفات روی افزایش داد (جدول B6).

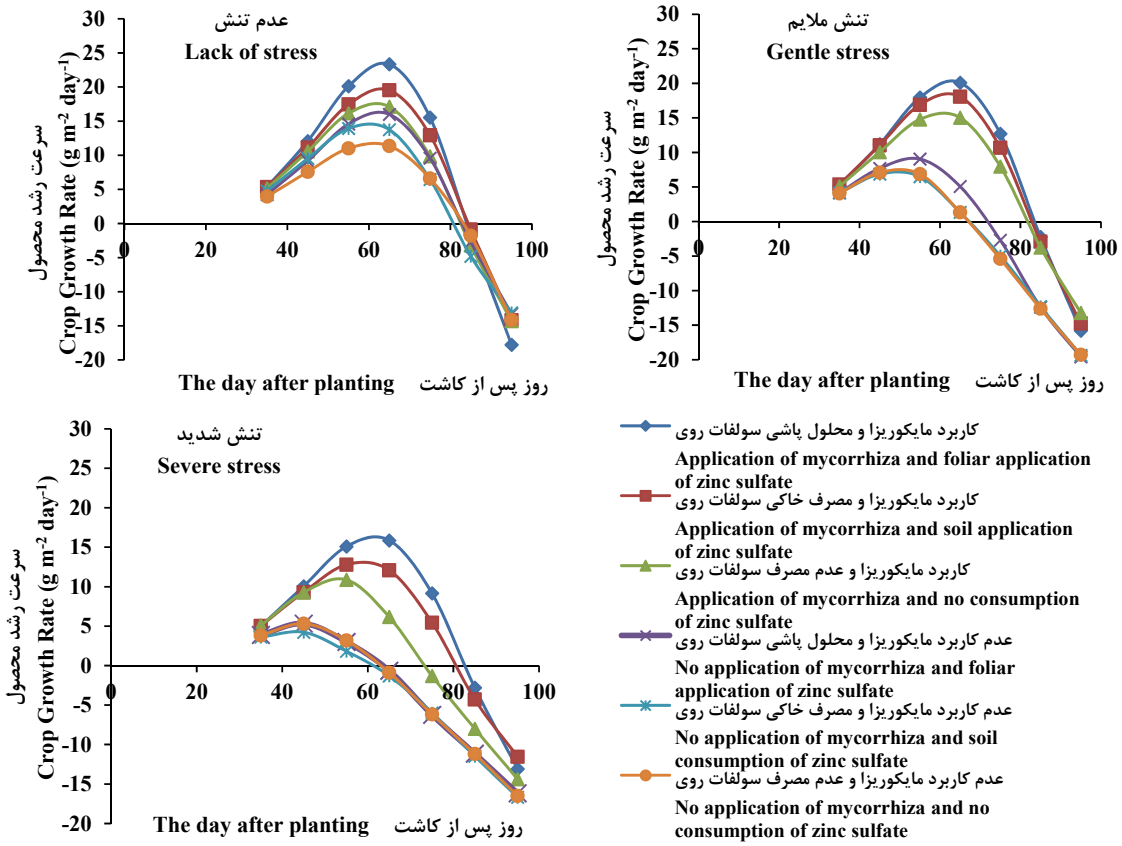
جدول ۴. ضرایب پیش‌بینی ماده خشک کل a ±SE، b ±SE، c ±SE، میانگین مربعات خطا (MSE) و ضرایب تبیین (R^2)

Table 4. Total dry matter prediction coefficients a ± SE, b ± SE, c ± SE, mean square error (MSE) and coefficient of determination (R^2)

تنش رطوبتی Moisture stress (mm)	مایکوریزا Mycorrhiza	Zinc sulfate application method	شیوه مصرف سولفات روی	a ±SE	b ±SE	c ±SE	MSE	R^2
60	تلقیح Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-1.67±0.06	0.20±0.002	-0.001±0.00002	0.00006	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-1.15±0.13	0.18±0.005	-0.001±00004	0.0004	0.99
		No use	عدم مصرف	-1.23±0.11	0.18±0.004	-0.001±0.00004	0.0003	0.98
	عدم تلقیح No inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-1.72±0.55	0.19±0.02	-0.001±0.0002	0.006	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-1.28±0.26	0.18±0.01	-0.001±0.00008	0.001	0.97
		No use	عدم مصرف	-1.03±0.12	0.17±0.004	-0.0013±0.00004	0.0003	0.99
90	تلقیح Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-1.49±0.10	0.19±0.004	-0.001±0.00003	0.0002	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-1.16±0.13	0.18±0.005	-0.001±0.00004	0.0003	0.99
		No use	عدم مصرف	-1.06±0.19	0.18±0.007	-0.001±0.00006	0.0007	0.99
	عدم تلقیح No inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-1.86±0.40	0.21±0.015	-0.001±0.0001	0.003	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-2.04±0.57	0.224±0.02	-0.002±0.00019	0.007	0.98
		No use	عدم مصرف	-2.36±0.58	0.23±0.02	-0.001±0.0002	0.007	0.98
120	تلقیح Inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-1.10±0.16	0.18±0.006	-0.001±0.00005	0.0005	0.99
		Soil	مصرف خاکی	-0.73±0.30	0.17±0.011	-0.001±0.0001	0.002	0.99
		No use	عدم مصرف	-1.60±0.16	0.201±0.006	-0.001±0.00005	0.0005	0.99
	عدم تلقیح No inoculation	Foliar	محلول‌پاشی	-2.1±0.56	0.23±0.02	-0.002±0.0002	0.006	0.97
		Soil	مصرف خاکی	-1.37±0.38	0.204±0.01	-0.002±0.0001	0.003	0.98
		No use	عدم مصرف	-2.45±0.56	0.24±0.02	-0.002±0.0002	0.006	0.97

مایکوریزا می‌تواند با افزایش طول ریشه‌ها و همچنین افزایش سطح جذب توسط ریشه‌های خارجی، جذب عناصر غیر متحرک مانند روی را افزایش دهد ولی مکانیسم‌های افزایشی جذب روی الزاماً همان مکانیسم‌های جذب فسفر نیستند (Ezzati Lotfabadi et al., 2021). همچنین مایکوریزا با باز نگه‌داشتن و افزایش تعداد روزنه‌های برگ موجب افزایش جذب روی در هنگام محلول‌پاشی می‌شود زیرا که در شیوه محلول‌پاشی عناصر غذایی از طریق روزنه‌های

برگ هم جذب گیاه می‌شوند (Abdallah et al., 2013). محلول‌پاشی سولفات روی سبب افزایش ۱۹/۲۴ درصدی سرعت رشد محصول نسبت به مصرف خاکی در تمام تنش‌ها شد. درحالی‌که در تنش شدید اختلاف معنی‌داری بین مصرف خاکی سولفات روی و عدم مصرف سولفات روی مشاهده نشد (جدول C6). دلیل برتری محلول‌پاشی نسبت به مصرف خاکی سولفات روی را جذب بهتر روی از طریق برگ نسبت به ریشه به دلیل تثبیت و غیرقابل جذب شدن عنصر روی به‌ویژه توسط فسفات در مصرف خاکی سولفات روی، گزارش کرده‌اند (Malakouti, 2015).



شکل ۲. روند تغییرات سرعت رشد محصول سویا تحت تأثیر مایکوریزا، شیوه مصرف سولفات روی و تنش رطوبتی

Fig. 2. Trend of changes in soybean crop growth rate under the influence of mycorrhiza, zinc sulfate application method and moisture stress

ماده خشک کل

سیگموئیدی بودن روند تجمع ماده خشک کل در تمام تیمارها مشاهده شد (شکل ۳ و جدول ۴). در اوایل رشد به دلیل کم بودن شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول (شکل‌های ۱ و ۲) و همچنین اختصاص بیش‌تر مواد فتوسنتزی به ریشه‌ها، ماده خشک کل کم است ولی به‌تدریج با افزایش سطح برگ، سرعت رشد و توسعه اندام‌های هوایی و ریشه، ماده خشک کل افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد، درنهایت در انتهای فصل رشد به دلیل پیری برگ‌ها، تنفس بیشتر از فتوسنتز (انتقال مواد از اندام‌های گیاهی به دانه‌ها) و ریزش برگ‌ها ماده خشک در گیاه ثابت‌شده و سپس کاهش می‌یابد (Habibzadeh et al., 2012). نتایج حاصل نشان داد که روند تجمع ماده خشک نیز مانند شاخص سطح برگ و سرعت رشد تحت تأثیر تیمارهای بکار رفته قرار گرفت (شکل ۳ و جدول ۴). در این پژوهش همانند روند تغییرات شاخص سطح برگ، ملاحظه شد که تحت تنش رطوبت، سویا زودتر به حداکثر ماده خشک کل رسید. البته کاربرد مایکوریزا شدت این مسئله را کاهش داد و موجب افزایش طول دوره رشد سویا گردید (شکل ۳ و جدول ۴).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر دوجانبه تنش رطوبتی و مایکوریزا (A)، شیوه مصرف سولفات روی و مایکوریزا (B)، تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی (C) بر بیشینه شاخص سطح برگ سویا

Table 5. Comparison of the mean of the dual interaction, moisture stress and mycorrhiza (A), application method of zinc sulfate and mycorrhiza (B), moisture stress and application method of zinc sulfate (C) on the maximum leaf area index of soybean

A		Moisture stress (mm) تنش رطوبتی		
Mycorrhiza	مایکوریزا	60	90	120
Inoculation	تلقیح	4.53 [a]	4.05 [b]	3.14 [c]
No inoculation	عدم تلقیح	3.22 [c]	2.32 [d]	1.49 [e]
B		**Zinc sulfate application method شیوه مصرف سولفات روی**		
Mycorrhiza	مایکوریزا	Foliar محلول‌پاشی	Soil مصرف خاکی	No use عدم مصرف
Inoculation	تلقیح	4.42 [a]	3.88 [b]	3.41 [c]
No inoculation	عدم تلقیح	2.61 [d]	2.26 [e]	2.15 [e]
C		**Moisture stress (mm) تنش رطوبتی**		
Zinc sulfate application method	شیوه مصرف سولفات روی	60	90	120
Foliar	محلول‌پاشی	4.4 [a]	3.48 [c]	2.66 [f]
Soil	مصرف خاکی	3.75 [b]	3.21 [d]	2.27 [g]
No use	عدم مصرف	3.46 [c]	2.87 [e]	2.02 [h]

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نیستند

Values followed by common letters are not significantly different according to Duncan test, P= 0.05.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر دوجانبه تنش رطوبتی و مایکوریزا (A)، شیوه مصرف سولفات روی و مایکوریزا (B)، تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی (C) بر بیشینه شاخص سرعت رشد محصول (گرم بر مترمربع در روز)

Table 6. Comparison of the mean of the dual interaction, moisture stress and mycorrhiza (A), application method of zinc sulfate and mycorrhiza (B), moisture stress and application method of zinc sulfate (C) on the maximum growth rate of soybean ($g.m^{-2}.day^{-1}$)

A		Moisture stress (mm) تنش رطوبتی		
Mycorrhiza	مایکوریزا	60	90	120
Inoculation	تلقیح	20.49 [a]	18.09 [b]	13.47 [c]
No inoculation	عدم تلقیح	13.79 [c]	8.21 [d]	5.51 [e]
B		**Zinc sulfate application method شیوه مصرف سولفات روی**		
Mycorrhiza	مایکوریزا	Foliar محلول‌پاشی	Soil مصرف خاکی	No use عدم مصرف
Inoculation	تلقیح	19.97 [a]	17.23 [b]	14.85 [c]
No inoculation	عدم تلقیح	10.46 [d]	8.82 [e]	8.22 [e]
C		**Moisture stress (mm) تنش رطوبتی**		
Zinc sulfate application method	شیوه مصرف سولفات روی	60	90	120
Foliar	محلول‌پاشی	19.91 [a]	14.69 [c]	11.05 [e]
Soil	مصرف خاکی	16.89 [b]	13.05 [d]	9.14 [f]
No use	عدم مصرف	14.62 [c]	11.71 [e]	8.28 [f]

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نیستند

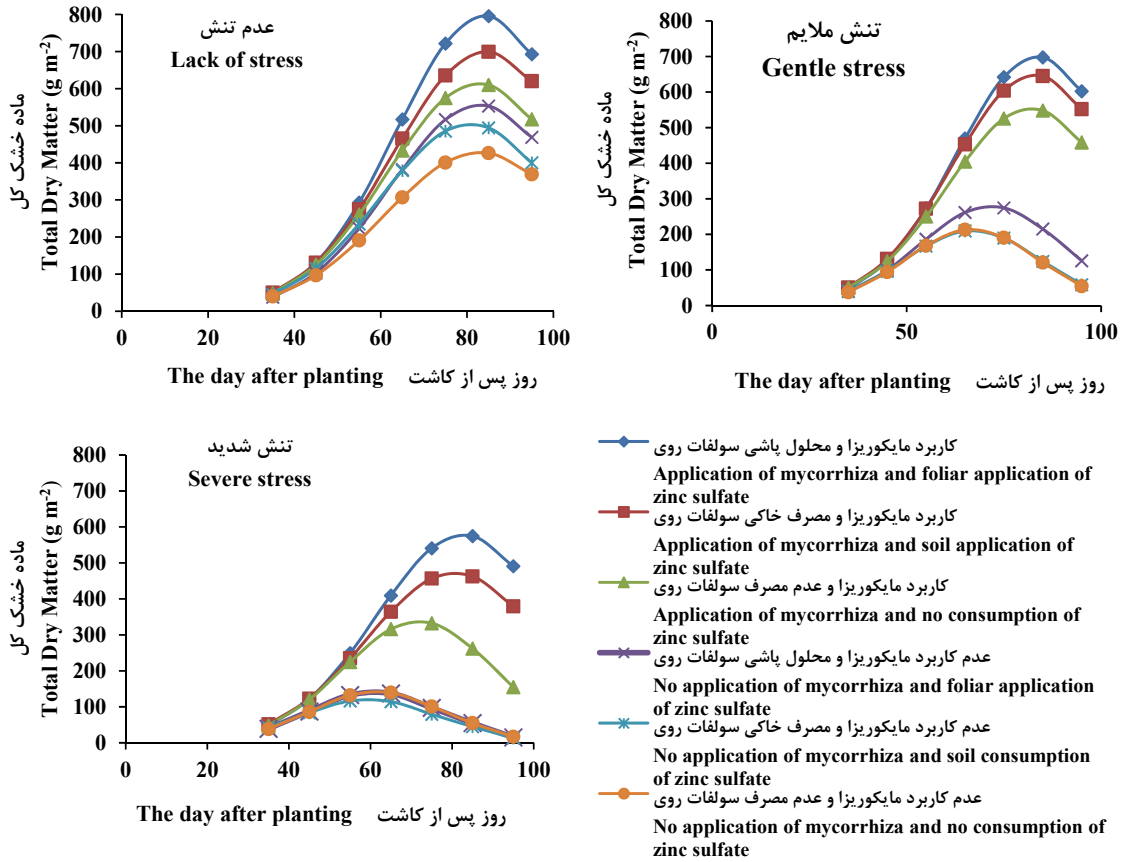
Values followed by common letters are not significantly different according to Duncan test, P= 0.05.

رهبریان و همکاران (Rahbarian et al., 2011) دلیل افزایش طول دوره رشد گیاه توسط مایکوریزا را در شرایط تنش خشکی، توسعه بیش‌تر ریشه و درنتیجه جذب بیش‌تر آب و مواد غذایی عنوان کرده‌اند. به‌علاوه مایکوریزا با تولید

مواد محرک رشد ازجمله هورمون IAA، جیبرلین و سیتوکنین و افزایش تعداد گره‌های تثبیت نیتروژن موجب افزایش اثربخشی سایر ریز جانداران تثبیت‌کننده نیتروژن به‌خصوص ریزوبیوم می‌شود (Srikantaiah et al., 2014).

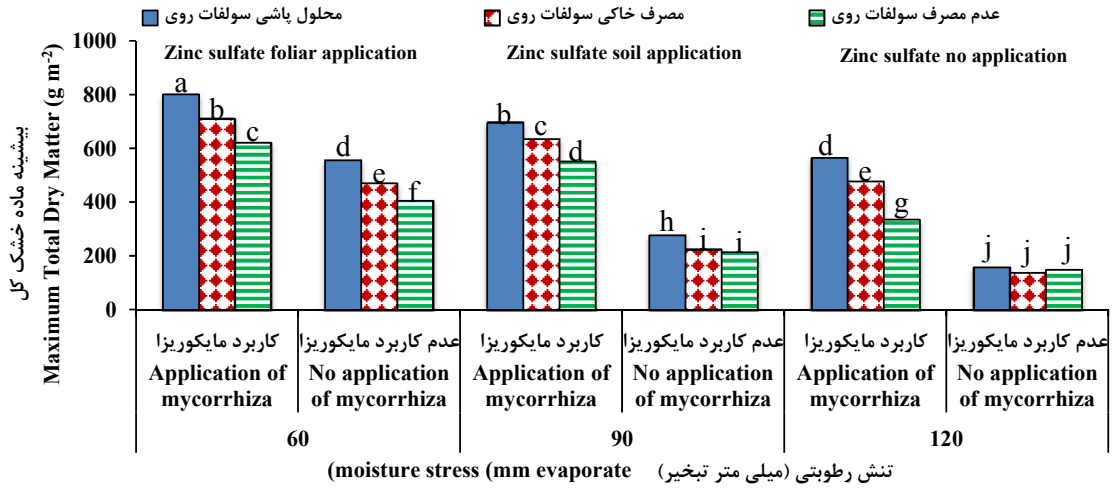
نتایج تجزیه واریانس بیشینه ماده خشک کل نیز نشان داد که تمام اثرات اصلی و چندجانبه به‌جز اثر دوجانبه تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی در سطح یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین بیشینه ماده خشک کل نشان داد که تنش‌های شدید و ملایم در تیمارهای عدم کاربرد مایکوریزا و عدم مصرف سولفات روی موجب کاهش ماده خشک کل به ترتیب ۴۷/۲۲ و ۶۳/۰۴ درصد شد ولی کاربرد مایکوریزا در این تیمارها شدت اثرات تنش‌های رطوبتی را کاهش داد و به‌طور میانگین موجب افزایش ۱۱۱/۲۰ درصدی در ماده خشک کل گردید (شکل ۴). یکی از اثرات مایکوریزا، افزایش فعالیت سیستم‌های آنزیمی و غیر آنزیمی آنتی‌اکسیدانی است که موجب افزایش رشد ریشه و اندام‌های هوایی و ماده خشک کل گیاه شده است (Habibzadeh et al., 2012). از سوی دیگر، در شرایط عدم کاربرد مایکوریزا محلول‌پاشی سولفات روی در تمام تنش‌های رطوبتی نسبت به مصرف خاکی به‌طور میانگین سبب افزایش ۲۰ درصدی ماده خشک کل شد که نشان می‌دهد محلول‌پاشی روی سبب رسیدن بهتر روی به گیاه نسبت به مصرف خاکی می‌شود. البته مصرف خاکی سولفات روی نیز بی‌تأثیر بر وزن خشک کل سویا نبود و در شرایط عدم کاربرد مایکوریزا و در تمام تنش‌های رطوبتی به‌طور میانگین موجب افزایش ۷/۴۸ درصدی ماده خشک کل شد (شکل ۴).

.



شکل ۳. روند تغییرات ماده خشک کل سویا تحت تأثیر مایکوریزا، شیوه مصرف سولفات روی و تنش رطوبتی

Fig. 3. Trend of changes in total soybean dry matter under the influence of mycorrhiza, zinc sulfate application method and moisture stress



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر چندجانبه تنش رطوبتی، مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی بر بیشینه ماده خشک کل سویا (میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد هستند)

Fig. 4. Comparison of the mean interaction of moisture stress, mycorrhiza and zinc sulfate application method on the total dry matter of soybean (Values followed by different letters are significantly different according to Duncan test, P= 0.05)

استفاده از روی موجب تحریک فعالیت‌های فتوسنتزی، افزایش میزان آسیمیلات‌های تولیدی، افزایش کربوهیدرات های محلول و درنتیجه افزایش وزن خشک کل می‌شود (Malakouti, 2015). در این زمینه، کاربرد مایکوریزا می‌تواند حدود ۲۵ درصد از روی موردنیاز گیاه میزبان را تأمین کند (Aghababaei et al., 2011).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه نشان داد که اثرات اصلی و اثرات دوجانبه در سطح یک درصد معنی‌دار شد ولی اثر سه‌جانبه بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین عملکرد دانه نشان می‌دهد که مایکوریزا در تنش رطوبتی عملکرد دانه را ۱۷۴/۵۸ درصد افزایش داد (جدول A7). عملکرد دانه تحت تأثیر شاخص‌های رشد گیاه قرار دارد و مایکوریزا با بهبود این شاخص‌ها از طریق جذب بهتر آب و مواد غذایی موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود (Habibzadeh et al., 2012). در اثر دوجانبه مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی ملاحظه می‌شود که عدم تلقیح با مایکوریزا منجر به عدم تفاوت مصرف خاکی با عدم مصرف سولفات روی در عملکرد سویا گردیده است (جدول B7) قارچ مایکوریزا از طریق تغییر در شکل و حجم ریشه یا به‌عبارت‌دیگر افزایش حجم خاک در تماس با مایکوریزا (قارچ-ریشه) موجب بهبود وضعیت تغذیه‌ای و سطح ترکیبات هورمونی گیاه می‌شود (Srikantaiah et al., 2014). همچنین مایکوریزا سبب افزایش تعداد برگ‌ها، افزایش تعرق، تعداد روزنه‌ها و باز شدن روزنه‌های برگ می‌شود (Sabannavar and Lakshman, 2008) که همین امر می‌تواند موجب افزایش کارایی محلول‌پاشی سولفات روی شود. در اثر دوجانبه تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی نیز مشاهده شد که محلول‌پاشی نیز نسبت به مصرف خاکی عملکرد دانه را ۳۵/۰۶ درصد افزایش داد (جدول C7) که نشان‌دهنده کارایی بیش‌تر روش محلول‌پاشی نسبت به مصرف خاکی است و همچنین نشان‌دهنده تأثیر بالای عنصر روی در افزایش عملکرد دانه و کاهش اثرات تنش در سویا است. در آزمایشی بر روی سویا مشخص شده است که محلول‌پاشی سولفات روی موجب افزایش عملکرد دانه و کاهش اثرات تنش بر روی این گیاه شده است و دلیل آن را نقش عنصر روی در تقویت جدار سلولی و درنتیجه افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش محیطی اعلام کرده‌اند (Odeley et al., 2007).

درصد همزیستی ریشه با مایکوریزا:

تمام اثرات به‌جز اثر دوجانبه تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی و اثر سه‌جانبه تنش رطوبتی، مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی بر صفت درصد همزیستی ریشه با مایکوریزا در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

بیش‌ترین درصد همزیستی در اثر دوجانبه مایکوریزا و تنش رطوبتی در تنش رطوبتی ملایم به میزان ۶۵/۳۳ درصد رخداده است (جدول A8). تنش رطوبتی موجب افزایش همزیستی مایکوریزا می‌شود (Naseri et al., 2015). به نظر می‌رسد در شرایط تنش رطوبتی وابستگی گیاه به قارچ بیش‌تر می‌شود تا شرایط تنشی را راحت‌تر سپری کند. البته اگر شدت تنش زیاد شود و قارچ مایکوریزا هم نتواند اثرات مثبت بر گیاه داشته باشد می‌تواند اثر معکوس بر درصد همزیستی قارچ با ریشه گیاه داشته باشد (Majidi and Amiri, 2020). همچنین مصرف خاکی سولفات روی نیز موجب کاهش درصد همزیستی مایکوریزا شده است (جدول B8).

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر دوجانبه تنش رطوبتی و مایکوریزا (A)، شیوه مصرف سولفات روی و مایکوریزا (B)، تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی (C) بر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)

Table 7. Comparison of the mean of the dual interaction, moisture stress and mycorrhiza (A), application method of zinc sulfate and mycorrhiza (B), moisture stress and application method of zinc sulfate (C) on the soybean yield (kg ha^{-1})

A		تنش رطوبتی (mm) Moisture stress		
Mycorrhiza	مایکوریزا	60	90	120
Inoculation	تلقیح	2360 a	2042 b	1264 c
No inoculation	عدم تلقیح	1314 c	730 d	347 e
B		**شیوه مصرف سولفات روی Zinc sulfate application method**		
Mycorrhiza	مایکوریزا	محلول‌پاشی Foliar	مصرف خاکی Soil	عدم مصرف No use
Inoculation	تلقیح	2301 a	1831 b	1534 c
No inoculation	عدم تلقیح	1028 d	726 e	636 e
C		**تنش رطوبتی Moisture stress (mm)**		
Zinc sulfate application method	شیوه مصرف سولفات روی	60	90	120
Foliar	محلول‌پاشی	2302 a	1691 b	1001 f
Soil	مصرف خاکی	1734 b	1317 d	786 g
No use	عدم مصرف	1476 c	1150 e	629 h

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نیستند

Values followed by common letters are not significantly different according to Duncan test, P= 0.05.

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر دوجانبه تنش رطوبتی و مایکوریزا (A)، شیوه مصرف سولفات روی و مایکوریزا (B) بر درصد همزیستی ریشه با مایکوریزا

Table 8. Comparison of the mean of the dual interaction, moisture stress and mycorrhiza (A) and application method of zinc sulfate and mycorrhiza (B) on the percentage of root colonization with mycorrhiza

A		تنش رطوبتی (mm) Moisture stress		
Mycorrhiza	مایکوریزا	60	90	120
Inoculation	تلقیح	48.4 c	65.3 a	53 b
No inoculation	عدم تلقیح	6.9 d	5 e	3.4 f
B		**شیوه مصرف سولفات روی Zinc sulfate application method**		
Mycorrhiza	مایکوریزا	محلول‌پاشی Foliar	مصرف خاکی Soil	عدم مصرف No use
Inoculation	تلقیح	59.4 a	50.7 c	56.7 b
No inoculation	عدم تلقیح	5.2 de	4.7 e	5.4 d

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نیستند

Values followed by common letters are not significantly different according to Duncan test, P= 0.05.

شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2010) بیان می‌کنند که با افزایش روی خاک، درصد همزیستی مایکوریزا چه به‌صورت منفرد و یا همراه با باکتری ریزوبیوم به‌صورت محسوسی کاهش یافت و دلیل آن را اثر منفی عنصر روی در رویش هاگ‌های مایکوریزایی بیان کرده‌اند.

کارایی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که صفت کارایی مصرف آب تحت تأثیر تمامی اثرات اصلی و اثرات دوجانبه در سطح یک درصد قرار گرفت ولی اثر سه‌جانبه تنش رطوبتی، مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین کارایی مصرف آب در اثر دوجانبه مایکوریزا و تنش رطوبتی نشان می‌دهد که مایکوریزا در عدم تنش، تنش ملایم و تنش شدید به ترتیب سبب افزایش ۸۰/۴۹، ۱۸۳/۳۳، ۲۷۵ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به عدم کاربرد مایکوریزا شده است (جدول A9).

مایکوریزا با گسترش سیستم هیف خود در اطراف ریشه موجب افزایش تماس ریشه با خاک و توانایی جذب آب بیش‌تر خواهد شد که این امر سبب تورژسانس، طویل شدن سلول‌ها، تنظیم اسمزی و بهبود روابط آب و گیاه می‌شود (Peymaneh and Zarei, 2013) با بررسی اثر دوجانبه مایکوریزا و شیوه مصرف سولفات روی مشاهده شد که کاربرد مایکوریزا سبب افزایش ۱۳۸/۰۹ درصدی اثربخشی مصرف خاکی و ۱۱۷/۲۴ درصدی محلول‌پاشی سولفات روی می‌شود (جدول B9). عزتی لطف‌آبادی و همکاران (Ezzati Lotfabadi et al., 2021) بیان کرده‌اند که کاربرد مایکوریزا در سویا موجب افزایش دو برابری رشد و بیوماس گیاه مزبور تحت تنش خشکی شد، همچنین جذب عناصری مانند فسفر، روی، مس و منگنز را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد. از سوی دیگر کاربرد مایکوریزا موجب افزایش تعداد روزنه‌ها و افزایش آماس برگی می‌شود (Sabannavar and Lakshman, 2008)؛ که خود اثربخشی محلول‌پاشی را ارتقاء می‌دهد. با بررسی اثر دوجانبه تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی نیز مشاهده شد که محلول‌پاشی سولفات روی در شرایط تنش موجب افزایش ۵۲/۶۷ درصدی کارایی مصرف آب گردید (جدول C9). ادلی و همکاران (Odeley et al., 2007) بیان کردند که محلول‌پاشی سولفات روی در سویا موجب افزایش عملکرد دانه و مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود.

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر دوجانبه تنش رطوبتی و مایکوریزا (A)، شیوه مصرف سولفات روی و مایکوریزا (B)، تنش رطوبتی و شیوه مصرف سولفات روی (C) بر کارایی مصرف آب (کیلوگرم دانه بر مترمکعب)

Table 9. Comparison of the mean of the dual interaction, moisture stress and mycorrhiza (A), application method of zinc sulfate and mycorrhiza (B) and moisture stress and application method of zinc sulfate (C) on the soybean water use efficiency (kg m^{-3})

A	تنش رطوبتی Moisture stress (mm)		
Mycorrhiza مایکوریزا	60	90	120
Inoculation تلقیح	0.74 a	0.51 b	0.3 d
No inoculation عدم تلقیح	0.41 c	0.18 e	0.08 f

B	شیوه مصرف سولفات روی Zinc sulfate application method		
Mycorrhiza مایکوریزا	محلول‌پاشی Foliar	مصرف خاکی Soil	عدم مصرف No use
Inoculation تلقیح	0.63 a	0.5 b	0.42 c
No inoculation عدم تلقیح	0.29 d	0.21 e	0.18 e

C	تنش رطوبتی Moisture stress (mm)		
Zinc sulfate application method شیوه مصرف سولفات روی	60	90	120
Foliar محلول‌پاشی	0.72 a	0.42 d	0.24 g
Soil مصرف خاکی	0.54 b	0.33 e	0.19 h
No use عدم مصرف	0.47 c	0.29 f	0.15 h

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نیستند

Values followed by common letters are not significantly different according to Duncan test, P= 0.05.

نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به نتایج، محلول‌پاشی سولفات روی کارآمدتر از مصرف خاکی سولفات روی بود زیرا به‌طور متوسط در هر سه سطح تنش رطوبتی بکار رفته، محلول‌پاشی سولفات روی در مقایسه با مصرف خاکی آن شاخص سطح برگ را ۱۴ درصد، سرعت رشد محصول را ۱۶/۷ درصد، عملکرد دانه را ۳۰ درصد

و کارایی مصرف آب را ۳۱ درصد افزایش داد. همچنین تلقیح گیاهان سویا با قارچ مایکوریزا منجر به بهبود قابل‌توجه صفات موردبررسی شد به‌طوری‌که گیاهان تلقیح شده با قارچ در هر سه سطح تنش رطوبتی، به ترتیب دارای ۶۷، ۸۹، ۱۳۶ و ۱۳۰ درصد شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب بیشتری بودند. البته این سودمندی‌ها با افزایش شدت تنش رطوبت کمتر بود؛ اما آنچه قطعی به نظر می‌رسد آن است که کارآمدی محلول‌پاشی و حتی مصرف خاکی سولفات روی را می‌توان از طریق کاربرد قارچ مایکوریزا افزایش داد.

منابع

Abdallah, M.M., Abd El-Monem, A.A., Hassanein, R.A., ElBassiouny, H.M.S., 2013. Response of sunflower plant to the application of certain vitamins and arbuscular mycorrhiza under different water regimes. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 7, 915-932.

Aboutalebian, M.A., Moqisaei, F., 2016. Effect of on farm seed priming and application methods of zinc sulfate fertilizer on some growth indices of two corn cultivars in Hamedan. Iranian Journal of Crop Production and Processing. 5, 255-267. [In Persian].

Aghababaei, F., Raiesi, F., Nadian, H., 2011. Influence of mycorrhizal symbiosis on the uptake of nutrients in some commercial genotypes of almond in a sandy loam soil. Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil And Water Sciences). 25, 147-137. [In Persian].

Alizadeh, A., 2010. The Relationship Between Water, Soil and Plants. Astan Quds Razavi Publications. Mashhad. [In Persian].

Ezzati Lotfabadi, Z., Weisany, W., Abdul-Razzak Tahir, N., Mohammadi Torkashvand, A., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi species improve the fatty acids profile and nutrients status of soybean cultivars grown under drought stress. Journal Applied Microbiology. 22, 318-352.

FAO., 2019. Faostat database. https://faostat.fao.org/

Fateh, H., Karimpour, M., Weisany, W., Sohrabi, Y., Farahmandi, H., Rahimzadeh, S., 2012. Effects of drought stress and zinc application on grain yield and some physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) cultivar of Williams. Iranian Journal of Plant and Ecosystem. 8, 99-77. [In Persian].

Habibzadeh, Y., Zardoshti, M. R., Pirzad, A., Jalilian, J., 2012. Effect of mycorrhizae fungi on growth indices and grain yield of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczk] under water deficit stress. Iranian Journal of Water and Soil Science. 1, 57-69. [In Persian].

Heidari, M., Karami, V., 2014. Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 13, 9-13.

Hu, Ch., Wong, W.T., Wu, R., Lai, W.F., 2019. Biochemistry and use of soybean isoflavones in functional food development. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 60, 2098–2112.

Kanani, E., Dehghanisanij, H., Akhavan, S., 2016. Effect of different irrigation methods and mulch on corn (*Zea mays* L.) evapotranspiration, yield, water use efficiency in a semiArid climate. In. 2ndWorld Irrigation Forum. 6-8 November. Chiang Mai. Thailand. pp,146-152.

Majidi, A., Amiri, P., 2020. Effect of two species of mycorrhizal arbuscular fungi in different levels of moisture stress on Some growth characteristics of maize. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 129-121. [In Persian].

Malakouti, M.J., 2015. Optimal Recommendation of Fertilizer Use for Agricultural Products in Iran. determining the amount. type and timing of fertilizer use with the aim of relative self-sufficiency. healthy food production and increasing farmers' incomes. Mobaleghan Publications. Tehran. [In Persian].

Mazaheri, D., Majnoon Hosseini, N., 2011. Fundamentals of General Agriculture. University of Tehran Publications. Tehran. [In Persian].

Monte, J. A., Carvalho, D.F., Medici, L.O., Silva, L.D.B., Pimentel, C., 2013. Growth analysis and yield of tomato crop under different irrigation depths. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 17, 926-931.

Naseri, R., Barary, M., Zarea, M., Khavazi, K., Tahmasebi, Z., Yaghotipoor, A., 2018. Effect of phosphate solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi on phenological and physiological characteristics of wheat under dryland conditions. Crop Ecophysiology. 12, 211-236. [In Persian].

Odeley, F.O., Odeley, O.M.O., Animashaun, M.O., 2007. Effects of nutrient foliar spray on soybean growth and yield (*Glycine max* L.) in south west Nigeria. Australian Journal of Crop Science. 35, 1842-4309.

Oilepa., 2019. import-statistics. https://www.oilepa.com/

Peymaneh, Z., Zarei, M., 2013. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth parameters and nutrients uptake of sour orange (*Citrus aurantium*) under water stress conditions. Iranian Journal of Soil Biology. 1, 24-13. [In Persian].

Phillips, J.M., Hayman, D.S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular- mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society. 55, 157-160.

Quchi, Z.E., 2012. The effect of combined application of livestock. chemical and biological fertilizers on the quantity and quality of fodder corn (*Zea mays* L.), MSc Thesis. Guilan University. Guilan, Iran. [In Persian].

Rahbarian, R., Khavari-nejad, R.A., Ganjeali, A., Bagheri, A.R., Najafi, F., 2011. Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. ACTA Biological Cracoviensia Series Botanica. 53, 47-56.

Sabannavar, S.J., Lakshman, H.C., 2008. Interactions between Azotobacter pseudomonas and arbuscular mycorrhizal fungi on two varieties of *Sesamum indicum* L. Agronomy and Crop Science. 194, 470-478.

Sharifi, M., Karimi, F., Khanpourardestani, N., 2010. Mycorrhiza (physiology and biotechnology), Biology House. Tehran. [In Persian].

Shool, A., Shamshiri, M. H., Akhgar, A. R., Esmailizadeh, M., 2015. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi and Pseudomonas fluorescent bactria on nutrient uptake of pistachio seedling (Pistacia vera Cv. Qazvini) under four irrigation regimes. Iranian Journal of Crop Production and Processing. 4, 171-184. [In Persian].

Srikantaiah, M., Umesha, S., Prasanna, K. S., Lakshmipathi, R. N., 2014. Growth and dry matter production of soybean as influenced by beneficial microorganisms under field conditions. Current Agriculture Research Journal. 2, 63-67.